



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



PROYECTO DE GRADO - INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN

Programación por metas aplicada a la recuperación y logística inversa

Autores:

Elena María GUGGERI

Carolina HAM

María Pilar SILVEYRA

Tutores:

Pedro PIÑEYRO

Daniel ROSSIT

Agosto de 2022

Resumen

En este informe se presenta un caso de estudio sobre las decisiones multicriterio en logística inversa de los envases usados en una empresa en el sector agroindustrial.

Para esto, en primera instancia, se recabó y analizó la literatura existente en torno a las metodologías aplicadas a la recuperación de productos usados y logística inversa. En especial, el método multicriterio de resolución de programación por metas.

A partir de esta investigación se definió trabajar con la empresa NutAgro, la cual mostró interés en el desarrollo sustentable de la industria. NutAgro es una empresa que comercializa líneas de nutrición de suelo, animal y vegetal. Cada línea de negocio cuenta con una gama de soluciones para el agro, variando las recetas y presentaciones de los productos. Luego de analizar las líneas de negocio de la empresa, se decidió que el alcance de este proyecto abarque únicamente los productos de nutrición animal y vegetal con envases rígidos.

Posteriormente, se realizó un estudio de la normativa existente en Uruguay asociada a la recuperación de envases del sector agroindustrial, así como también se investigó sobre la gestión actual de envases.

A continuación, se procedió a estudiar las posibilidades de recuperación de estos envases. Para ello, se realizó un relevamiento y análisis de datos de la empresa, y se realizaron dos modelos matemáticos para representar la situación actual de NutAgro. Uno de ellos representa la planificación de la producción y el otro modelo está enfocado en la distribución de la producción.

Luego, con el objetivo de estudiar la recuperación de envases, se extendieron los modelos para recolectar los envases de los productos ya utilizados y reintegrarlos a la cadena de suministro. Estos modelos se realizaron utilizando el método de programación por metas para poder contemplar distintos objetivos asociados a los costos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la cantidad de plástico utilizada. Debido a que no se conoce la calidad de los envases devueltos por los clientes, se incorporaron actividades asociadas a la inspección de estos envases.

Se procedió a comparar la solución obtenida en los modelos de la situación actual respecto a la solución que contempla la recuperación de envases. En términos generales, los resultados de dicho análisis mostraron que recuperar envases no implica grandes diferencias en los costos de la empresa, pero sí se obtienen resultados ambientales positivos.

Por último, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo con opciones de retorno para analizar la situación de recuperación bajo diferentes valores de interés de los parámetros.

Palabras clave: Recuperación, Planificación de la Producción, Logística Inversa, Programación por Metas, Programación Lineal Entera Mixta

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestros agradecimientos a nuestros tutores Pedro Piñeyro y Daniel Rossit, quienes nos acompañaron y apoyaron a lo largo de todo el proyecto; brindando sus experiencias y conocimientos. A su vez, nos proporcionaron las herramientas necesarias para que este proyecto llegara a buen término.

Por otra parte, nos gustaría agradecerle a la empresa NutAgro, quienes desde el primer momento demostraron interés en la temática y nos brindaron su tiempo para que este proyecto pueda realizarse. Damos gracias por colaborar con nosotros en la recolección de datos, así como también en la disposición para evacuar nuestras dudas.

Asimismo, queremos agradecer a todos los agentes que nos brindaron información útil para poder estudiar la factibilidad de este proyecto. En especial, queremos agradecer al equipo responsable de la implementación del decreto N° 152/013, así como también al equipo del departamento del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) encargado de la gestión de residuos. A su vez, nos gustaría agradecerle a la profesora Elizabeth Gonzalez, de la Facultad de Ingeniería, quien nos brindó su conocimiento acerca de la temática y nos guió en la búsqueda de la información necesaria.

Por último, pero no menos importante, nos resta agradecerle a nuestra familia y amigos por el apoyo incondicional que nos han brindado durante nuestra trayectoria estudiantil.

Índice

1. Introducción	13
2. Marco teórico	15
2.1. Problema multicriterio	15
2.2. Programación por metas	15
2.3. Cadenas de suministro de circuito cerrado	16
3. Logística inversa en el sector agropecuario en Uruguay	19
3.1. Situación del sector agro en Uruguay	19
3.2. Normativa de recuperación en Uruguay	19
3.2.1. Investigación de la gestión de envases	20
4. Caso de estudio: NutAgro	23
4.1. Descripción de la empresa	23
4.2. Procesos productivos	23
4.3. Comercialización y distribución	24
4.4. Asociación con EcoCampo	25
5. Planificación de la producción y distribución de la producción sin opciones de retorno	27
5.1. Problema de Planificación de la producción	27
5.1.1. Formulación del Modelo Matemático	28
5.2. Problema de distribución de la producción	29
5.2.1. Formulación del Modelo Matemático	30
5.3. Validación de los modelos	33
5.3.1. Planificación de la producción	33
5.3.2. Distribución de la producción	35
6. Planificación de la producción y distribución de la producción con opciones de retorno	43
6.1. Diseño del sistema de recuperación de envases	43
6.2. Problema de Planificación de la producción	44
6.2.1. Formulación del Modelo Matemático	45
6.3. Problema de Distribución de la producción	48
6.3.1. Formulación del Modelo Matemático	48
6.4. Validación de modelos	53
6.4.1. Planificación de la producción	53
6.4.2. Distribución de la producción	55
6.5. Formulación de los modelos con Programación por Metas	58
6.5.1. Planificación de la producción con recuperación de envases	59
6.5.2. Distribución de la producción con recuperación de envases	60
7. Relevamiento y análisis de datos	63
7.1. Datos proporcionados por la empresa	63
7.2. Datos estimados	63
7.2.1. Datos para la Planificación de la producción	64
7.2.2. Datos para la Distribución de la producción	65
8. Metodología para la resolución de los modelos	69
8.1. Relaciones entre modelos	69
8.1.1. Relaciones entre los modelos sin opciones de retorno	69
8.1.2. Relaciones entre los modelos con opciones de retorno	70
8.2. Obtención de metas y secuencia general de modelos	72

9. Análisis de resultados del caso base	77
9.1. Planificación de la producción sin opciones de retorno	77
9.2. Distribución de la producción sin opciones de retorno	78
9.3. Análisis global sin opciones de retorno	78
9.4. Planificación de la producción con opciones de retorno	80
9.5. Distribución de la producción con opciones de retorno	80
9.6. Análisis global con opciones de retorno	82
9.7. Comparación entre modelos con y sin opciones de retorno	83
10. Experimentación numérica	87
10.1. Porcentaje de devoluciones de clientes a las canchas de acopio	87
10.1.1. Obtención de datos de análisis	87
10.1.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base	87
10.1.3. Comparación global de los escenarios	88
10.2. Maximización de la recuperación de envases	90
10.2.1. Obtención de datos de análisis	90
10.2.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base	91
10.2.3. Comparación global de los escenarios	92
10.3. Control de calidad realizado en planta	94
10.3.1. Obtención de datos de análisis	94
10.3.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base	95
10.3.3. Comparación global de los escenarios	95
10.4. Aumento de la demanda	97
10.4.1. Obtención de datos de análisis	97
10.4.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base	97
10.4.3. Comparación global de los escenarios	98
10.5. Incorporación de otro camión propio	100
10.5.1. Obtención de datos de análisis	101
10.5.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base	101
11. Conclusiones y trabajos futuros	104
Referencias	107
Anexo 1: Estado del Arte	110
Anexo 2: Validación de los modelos	140

Índice de figuras

1.	Fases de la logística inversa. Fuente: Elaboración propia.	18
2.	Producción y distribución actual de productos. Fuente: Elaboración propia.	25
3.	Flujo de recuperación de envases. Fuente: Elaboración propia.	43
4.	Producción, distribución y recolección de productos. Fuente: Elaboración propia.	44
5.	Secuencia de horizontes de tiempo en la resolución de modelos de planificación y distribución de la producción. Fuente: Elaboración propia.	69
6.	Alimentación de datos: Planificación de la producción sin opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.	70
7.	Alimentación de datos: Distribución de la producción sin opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.	70
8.	Alimentación de datos: Distribución de la producción con opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.	71
9.	Alimentación de datos: Planificación de la producción con opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.	72
10.	Obtención de metas de cada modelo.	75
11.	Relación de costos sin opciones de retorno.	79
12.	Relación de emisiones de CO ₂ equivalente sin opciones de retorno.	79
13.	Costos semanales en el modelo de de Distribución de la producción, con opciones de retorno.	81
14.	Emisiones semanales en el modelo de de Distribución de la producción, con opciones de retorno.	81
15.	Costos totales en los modelos de planificación y distribución de la producción, con opciones de retorno.	82
16.	Emisiones totales en los modelos de planificación y distribución de la producción, con opciones de retorno.	83
17.	Comparativos de costos totales, con y sin opciones de retorno.	84
18.	Comparativos de emisiones de los modelos de Planificación de producción, con y sin opciones de retorno.	84
19.	Comparativos de emisiones de los modelos de Distribución de producción, con y sin opciones de retorno.	85
20.	Comparativos de emisiones totales, con y sin opciones de retorno.	85
21.	Porcentaje de devolución - Análisis del costo.	88
22.	Porcentaje de devolución - Análisis de las emisiones ambientales.	89
23.	Porcentaje de devolución - Análisis de la cantidad de plástico.	89
24.	Maximización de recuperación - Análisis del costo.	92
25.	Maximización de recuperación - Análisis de las emisiones ambientales.	93
26.	Maximización de recuperación - Análisis de la cantidad de plástico.	93
27.	Maximización de recuperación - Análisis de la cantidad de envases recuperados por las canchas de acopio.	94
28.	Control de calidad - Análisis del costo.	96
29.	Control de calidad - Análisis de las emisiones ambientales.	96
30.	Control de calidad - Análisis de la cantidad de plástico.	97
31.	Aumento de demanda - Análisis del costo.	99
32.	Aumento de demanda - Análisis de las emisiones ambientales.	99
33.	Aumento de demanda - Análisis de la cantidad de plástico.	100
34.	Aumento de demanda - Análisis de la cantidad de envases recuperados.	100
35.	Incorporación de otro camión propio - Análisis del costo.	101
36.	Incorporación de otro camión propio - Análisis de las emisiones ambientales.	102
37.	Incorporación de otro camión propio - Análisis de la cantidad de plástico.	102

Índice de tablas

1.	Definición de productos - Planificación de la producción: Caso 1.	34
2.	Definición de líneas de producción - Planificación de la producción: Caso 1.	34
3.	Demanda pronosticada - Planificación de la producción: Caso 1.	34
4.	Conversión de unidades a masa de cada producto de nutrición animal - Planificación de la producción: Caso 1.	34
5.	Conversión de unidades a volumen de producto de nutrición vegetal - Planificación de la producción: Caso 1.	34
6.	Capacidad másica por período de producción de la línea de nutrición animal - Planificación de la producción: Caso 1.	34
7.	Capacidad volumétrica de producción de la línea de nutrición vegetal - Planificación de la producción: Caso 1.	35
8.	Cantidad producida del producto 1 - Planificación de la producción: Caso 1.	35
9.	Cantidad producida del producto 2 - Planificación de la producción: Caso 1.	35
10.	Cantidad producida del producto 3 - Planificación de la producción: Caso 1.	35
11.	Cantidad producida del producto 1 - Distribución de la producción: Caso 1.	36
12.	Stock inicial del producto 1 - Distribución de la producción: Caso 1.	36
13.	Demanda del producto 1 - Distribución de la producción: Caso 1.	37
14.	Porcentaje de demanda a satisfacer - Distribución de la producción: Caso 1.	37
15.	Cantidad entregada del producto 1 en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 1.	37
16.	Demanda de cada cliente por producto en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.	38
17.	Demanda de cada cliente por producto en el período 2 - Distribución de la producción: Caso 2.	38
18.	Demanda de cada cliente por producto en el período 3 - Distribución de la producción: Caso 2.	39
19.	Capacidad volumétrica del camión propio - Distribución de la producción: Caso 2.	39
20.	Conversión volumétrica de cada producto - Distribución de la producción: Caso 2.	39
21.	Cantidad máxima de viajes del camión propio - Distribución de la producción: Caso 2.	39
22.	Entregas a cada cliente en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.	40
23.	Entregas a cada cliente en el período 2 - Distribución de la producción: Caso 2.	40
24.	Entregas a cada cliente en el período 3 - Distribución de la producción: Caso 2.	40
25.	Demanda en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 3.	41
26.	Variable binaria que representa los viajes en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 3.	41
27.	Cantidad de mercadería enviada del producto 1 en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 3.	42
28.	Demanda pronosticada - Planificación de la producción: Caso 1.	53
29.	Costo de reacondicionar envase recuperado - Planificación de la producción: Caso 1.	53
30.	Costo del envase nuevo por producto - Planificación de la producción: Caso 1.	54
31.	Stock inicial de envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.	54
32.	Cantidad producida del producto 1 con envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.	54
33.	Cantidad producida del producto 2 con envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.	54
34.	Cantidad producida del producto 3 con envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.	54
35.	Cantidad de unidades a producir del producto 1 con envases nuevos - Planificación de la producción: Caso 1.	54

36.	Cantidad de unidades a producir del producto 2 con envases nuevos - Planificación de la producción: Caso 1.	55
37.	Cantidad de unidades a producir del producto 3 con envases nuevos- Planificación de la producción: Caso 1.	55
38.	Demanda de cada cliente en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 1.	56
39.	Capacidad volumétrica del camión propio - Distribución de la producción: Caso 1.	56
40.	Cantidad máxima de viajes del camión propio - Distribución de la producción: Caso 1.	56
41.	Cantidad entregada por el camión propio en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 1.	57
42.	Variable de viajes realizados - Distribución de la producción: Caso 1.	57
43.	Demanda de cada cliente en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.	57
44.	Capacidad volumétrica del camión propio - Distribución de la producción: Caso 2.	57
45.	Stock inicial de envases disponibles a recuperar - Distribución de la producción: Caso 2.	58
46.	Porcentaje mínimo de recuperación - Distribución de la producción: Caso 2.	58
47.	Cantidad entregada por el camión propio en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.	58
48.	Envases recuperados por el camión propio en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.	58
49.	Variable de los viajes realizado - Distribución de la producción: Caso 2.	58
50.	Conjuntos de productos.	63
51.	Conjuntos de camiones para el problema sin opciones de retorno.	65
52.	Conjuntos de camiones para el problema con opciones de retorno.	66
53.	Conjuntos de envases	66
54.	Conjunto de clientes: N	67
55.	Tiempo de cómputo (CPU) requerido para resolver cada modelo con Gurobi, expresado en segundos.	77
56.	Capacidad ociosa por período de la línea de nutrición animal durante la semana 1.	77
57.	Capacidad ociosa por período de la línea de nutrición vegetal. El comportamiento se repite para todas las semanas.	78

1. Introducción

En este documento se presenta el proyecto realizado sobre un problema de carácter multicriterio de la recuperación y logística inversa de productos en una empresa.

El objetivo del proyecto consistió en la realización de un caso de estudio sobre las decisiones multicriterio en logística inversa de los productos usados en una industria local. Se seleccionó una planta y distribuidora de productos agroquímicos y de nutrición animal que cuenta con potencial para la recuperación de sus productos. Por motivos de confidencialidad, se modifica su nombre e información para el proyecto.

Las cadenas de suministro tradicionales manifiestan el interés de incorporar actividades que minimicen el impacto ambiental debido al creciente deterioro del medio ambiente en los últimos años [3]. Esto conlleva a la incorporación del concepto de ecoeficiencia en las empresas, lo cual implica la producción a precios competitivos mientras que simultáneamente desciende los impactos ecológicos de las actividades productivas [20].

Los procesos de fabricación se consideran los responsables primordiales del deterioro ambiental. Sin embargo, actualmente no es aceptable analizar únicamente los efectos locales e inmediatos de los procesos productivos, sino que también es necesario considerar los efectos del ciclo de vida de los productos completamente [3]. Así es como ha comenzado a surgir la tendencia de extender la cadena de suministro avanzada a un ciclo cerrado para integrar el flujo de mercadería de devolución al final de su vida útil, con sus siglas en inglés EOL (End of life) - *end of life* -.

Por otro lado, la logística inversa se puede definir como el “proceso de planificación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de materia prima, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el propósito de recuperar el valor o eliminarlo adecuadamente” [16]. Las decisiones asociadas con este término generalmente implican compensaciones entre diferentes objetivos en conflicto [23]. Es decir, trabajar sobre un objetivo puede repercutir negativamente en otro.

Los métodos multicriterio para la toma de decisiones (MCDM, de sus siglas del inglés “*Multi-criteria decision making*”) usualmente son enfoques utilizados cuando los problemas de decisiones tienen objetivos múltiples y contradictorios, ya que fomentan a estructurar la información y evaluar las decisiones [27]. MCDM puede permitir a los involucrados comprender y utilizar los resultados del método, facilitando el proceso de la obtención de recomendaciones sobre los objetivos [24].

Para llevar a cabo el proyecto, en primer lugar, se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre las decisiones multicriterio en logística inversa de los productos usados. Sus resultados se presentan en el estado del arte del presente documento (Anexo 1: Estado del Arte). En el mismo se desarrolló un abordaje conceptual de la temática, sus características y las aplicaciones de investigación en los últimos años.

Por otro lado, para el desarrollo y estudio de viabilidad del objetivo, se realizó una investigación sobre la normativa de recuperación de envases en el rubro. A su vez, se estudió en profundidad la realidad actual de la empresa. De esta manera, se realizó un modelo matemático que represente el funcionamiento actual de la misma. Para ello, se realizó un diseño de logística inversa, inexistente en la actualidad, para poder recuperar y reacondicionar envases, entendiendo esto como retorno de envases. Con dicho diseño, se procedió a realizar un nuevo modelo matemático, teniendo en cuenta no solo el costo de la actividad, sino también el impacto ambiental de la producción y logística asociada a los productos. De esta manera, se construyó un modelo multicriterio, que fue resuelto con el enfoque de programación por metas. Con la comparación de resultados de ambos modelos, se buscó estudiar la viabilidad del nuevo diseño de la cadena de suministro, midiendo los objetivos económicos y ambientales de la empresa.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta el marco teórico de problemas multicriterio, programación por metas y cadena de suministro; en la Sección 3 se presenta un contexto de la logística inversa en el sector agropecuario en Uruguay; en la Sección 4 se presenta la empresa elegida para el caso de estudio; en la Sección 5 se presentan y desarrollan los modelos de planificación y distribución de la producción sin opción de retorno; en la Sección 6

se presentan y desarrollan los modelos de planificación y distribución de la producción con opción de retorno; en la Sección 7 se detalla el relevamiento y análisis de datos recabados; en la Sección 8 se expone la metodología de resolución de los modelos; en la Sección 9 se muestra el análisis de resultados del caso base de estudio; en la Sección 10 se trabaja sobre la experimentación numérica de los parámetros; finalmente, en la Sección 11 se presentan las conclusiones y posibles trabajos a futuro sobre el sistema planteado.

2. Marco teórico

A continuación, se ahonda en el método multicriterio para la toma de decisiones, analizando específicamente el método de programación por metas. A su vez, se profundiza en la temática de la cadena de suministro de circuito cerrado, con el objetivo de proveer mayor información al lector para que pueda comprender más fácilmente los conceptos abordados en el proyecto.

2.1. Problema multicriterio

Los problemas de toma de decisiones multicriterio (de ahora en más, MCDM) refieren a situaciones en las que existen múltiples objetivos en general en conflicto entre sí, los cuales deben considerarse en simultáneo [4]. El Análisis de las Decisiones Multicriterio se constituye formalmente como una rama de la Investigación Operativa en los años setenta [7]. MCDM refiere a una clase general de métodos de Investigación de Operaciones, que tiene como objetivo cuantificar las alternativas factibles y ayudar a los tomadores de decisiones a seleccionar opciones o alternativas basadas en dos o más criterios [15] [22]. Además, MCDM apoya al centro decisor cuantificando criterios según su importancia, cuando existen múltiples objetivos [11].

Por lo general, los problemas MCDM cuentan con 5 componentes: objetivo, preferencias del centro decisor, alternativas, criterios y resultados [18]. Dentro de los problemas MCDM, existen distintas formas de clasificarlos, dependiendo de las características de cada problema. Una de éstas consiste en diferenciar dos grandes grupos: Análisis de Decisiones Multiatributo (MADM, por sus siglas en inglés “Multiattribute decision making”), y Análisis de Decisiones Multiobjetivo (MODM, por sus siglas en inglés “Multiobjective Decision Making”). Mientras que en MADM existe un conjunto definido de alternativas a considerar, en los problemas MODM se desconoce explícitamente el conjunto de soluciones factibles de antemano, a pesar de que este se acote a través de restricciones [11].

Además, los problemas multiobjetivo se caracterizan por que no exista una única solución, sino que se puede identificar un conjunto de soluciones de la misma calidad. Estas soluciones se conocen como no dominadas, eficientes, o *Soluciones óptimas de Pareto* [4].

2.2. Programación por metas

La programación por metas es un método de resolución multicriterio que no busca un valor óptimo, sino satisfacer metas y niveles previamente estipulados. Busca fijar niveles de aspiración para las distintas funciones objetivo y luego encontrar soluciones que se aproximen lo más posible a estos.

La formulación de un problema a resolver mediante Programación por metas sigue los siguientes pasos:

1. Fijar los criterios del problema ($f(x)$) que sean relevantes a partir de variables de decisión (x).
2. Asignar a cada uno de ellos un nivel de aspiración por parte del centro decisor (t).
3. Conectar el criterio con el nivel de aspiración por medio de variables de desviación negativa y positiva, respectivamente (n y p). La variable de desviación negativa cuantifica la falta de logro de una solución con respecto a su nivel de aspiración, mientras que la variable de desviación positiva cuantifica el exceso de logro de una solución con respecto a su nivel de aspiración.

De esta manera, la expresión algebraica de una meta i es:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad (1)$$

La programación por metas busca minimizar las variables de desviación no deseadas dentro de la zona factible del problema (F). La manera en que se hace dicho proceso de minimización dicta qué

variante de programación por metas se utiliza [17]. Por lo tanto, un modelo genérico de programación por metas se puede formular de la siguiente manera:

$$\text{Min } a = h(n, p) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad i = 1 \dots I \quad (3)$$

$$x \in F \quad (4)$$

$$n_i, p_i \geq 0 \quad i = 1 \dots I \quad (5)$$

Donde h es una función genérica de las variables de desviación.

Las principales variantes de la programación por metas son:

- **Programación por metas lexicográficas:** Esta variante del método de programación por metas se distingue por la existencia de niveles de prioridad que contienen ciertas variables de desviación a ser minimizadas lexicográficamente. Es decir que, la minimización de las variables de desviación de los niveles más altos es prioritaria a la de los niveles más bajos, lo que produce una serie de optimizaciones secuenciales, dejando fijados los valores mínimos de los niveles prioritarios y reduciendo la zona factible del problema.
- **Programación por metas ponderadas:** Permite balancear las variables de desviación no deseadas asociándoles distintos pesos normalizados en una única función objetivo.
- **Método Chebychev:** También conocida como Minmax, esta variante busca minimizar la máxima desviación de cualquier meta. Es aplicada en los casos en que el centro decisor busca una solución balanceada con respecto a todos los niveles de satisfacción de todas las metas.
- **Programación por metas Fuzzy:** Agrega el manejo de imprecisión a la programación por metas. Para ello, utiliza la teoría de Zadeh denominada como Fuzzy Set Theory [28]. La imprecisión se relaciona generalmente con los valores objetivo, aunque también se puede relacionar con otros aspectos en la estructura de la programación por metas.
- **Programación por metas entera y binaria:** Restringen una o más variables de decisión a un número discreto de valores. Esto resulta en problemas más difíciles de resolver que problemas únicamente lineales. Por ende, esta clase de programación por metas tiende a tiempos de resolución más largos y un número de variables de decisión y restricciones más acotado para que su resolución sea viable [10].

La elección de la variante de programación por metas a utilizar, depende de las características intrínsecas del problema a resolver, así como también de los intereses del centro decisor.

2.3. Cadenas de suministro de circuito cerrado

Debido a la tendencia creciente en el deterioro del medio ambiente, investigadores y profesionales han desarrollado mayor interés en su cuidado, estudiando e incluyendo actividades que minimicen el impacto ambiental [3]. Hay distintas razones por las cuales se ha aumentado el interés por la incorporación del flujo inverso, dentro de las cuales se encuentran tres principales [12]. En primer lugar, los fabricantes pueden generar una fuente más económica de materias primas y repuestos. A su vez, las regulaciones gubernamentales son otro factor importante ya que algunos países impusieron legislaciones de devolución a las empresas. Por último, la perspectiva de los clientes sobre las cuestiones ambientales ha impulsado a que la utilización de los productos recuperados se comience a considerar en las políticas de las empresas para mejorar la satisfacción de sus clientes. Sin embargo, también se considera que la logística inversa no surge como resultado de costos empresariales o la aprobación de leyes, sino que el objetivo principal de la logística inversa implica considerar la eficiencia y rentabilidad de los productos EOL

para fomentar el desarrollo sostenible de los productos, mientras que se cumple la normativa [25]. Es decir, la buena voluntad de elaborar productos mediante procedimientos socialmente responsables puede producir beneficios económicos para las empresas, pero también proteger al medio ambiente de diversos elementos peligrosos. Esto da lugar a lo que se conoce como economía circular, en donde comienza a considerarse la existencia de los productos luego de satisfacer las necesidades del cliente final. De esta forma, las empresas comienzan a abandonar el concepto de “fin de vida útil” del producto, e incorporan la reutilización y reciclaje de los elementos en el proceso de producción, con el objetivo de mejorar las calidades medioambientales, sociales y económicas [2].

El modelo general de la logística inversa puede contener distintas fases, tal como se puede observar en la Fig. 2, dentro de las cuales se encuentran [8] :

- Fase de recolección: En donde se lleva a cabo la colecta de los retornos. Esta compleja etapa abarca la planificación de las rutas, los tiempos de recolección, entre otros.
- Fase de clasificación: En esta etapa se decide el tratamiento a realizar en las devoluciones. Los retornos pueden ser reparados, reciclados, reprocesados, reutilizados, rechazados o eliminados. Es importante destacar que la reutilización puede abarcar la totalidad de la devolución o únicamente algunas partes.
- Fase de colocación: Una vez que los retornos son recolectados y clasificados, se debe tomar la decisión de qué hacer y cómo involucrarlos en el mercado nuevamente. Esto podría ser a través de venderlo nuevamente al cliente, venderlo en mercados secundarios a precios más bajos, donarlos o disponerlos a vertederos.
- Fase de control: Esta etapa busca evaluar la eficacia de los objetivos y controlar la eficacia del proceso de logística inversa. De esta forma, permite generar una realimentación al diseño del proceso en caso de que sea necesario, con el objetivo de optimizar las ganancias.

Es importante mencionar que en la literatura es posible encontrar diferentes nomenclaturas para la secuencia de pasos de la logística inversa. Sin embargo, usualmente el contenido de las terminologías se puede correlacionar fácilmente.

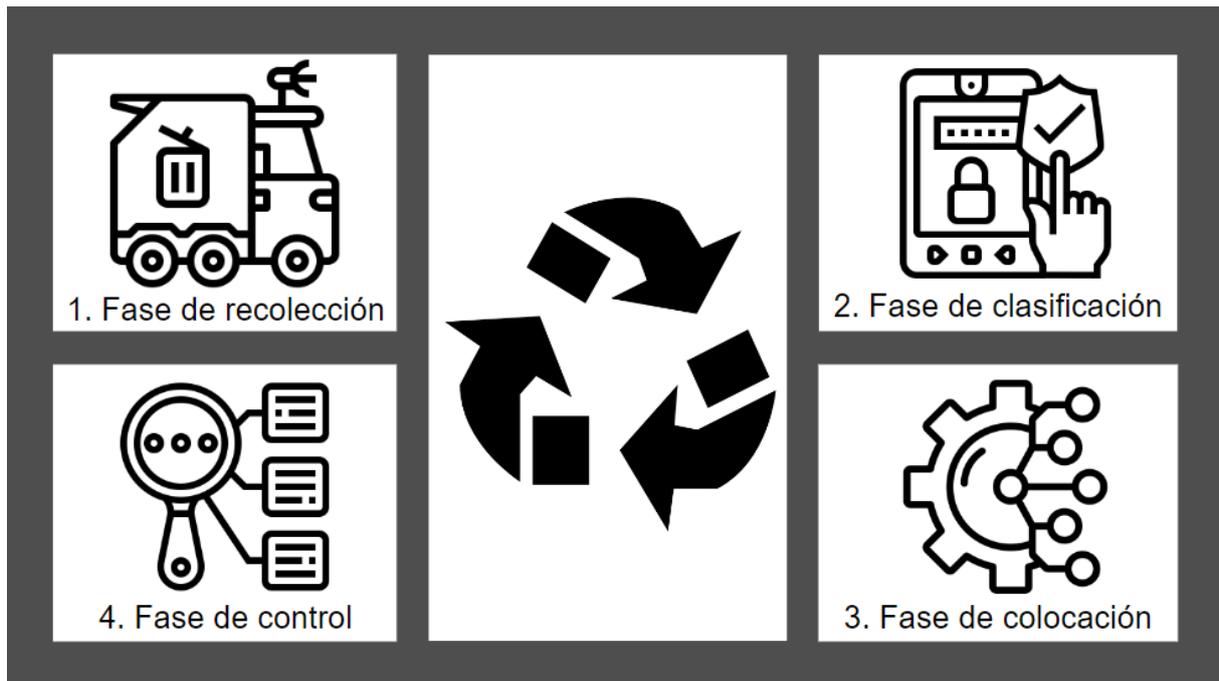


Figura 1: Fases de la logística inversa. Fuente: Elaboración propia.

Una cadena de suministro abarca todas las actividades necesarias para llevar a cabo un producto, desde la etapa de extracción de materia prima hasta el uso y satisfacción por parte del cliente [19]. El proceso de toma de decisiones en logística inversa se considera más engorroso comparado con la cadena de suministro hacia adelante debido a que usualmente consisten en problemas mal estructurados [9]. Por definición, un problema mal estructurado es aquel en donde las alternativas, objetivos, tomadores de decisión y partes interesadas no son obvios [9]. A su vez, “los datos necesarios para modelar el problema no suelen estar fácilmente disponibles” [6]. Los problemas de logística inversa generalmente contienen la incertidumbre de la cantidad y calidad de los productos devueltos, lo que conlleva a que las operaciones de recuperación se vuelvan más difíciles de realizar [14]. Por otro lado, la falta de un sistema definido para incorporar los productos utilizados desde los clientes a la cadena de suministro ocasiona que no sea un procedimiento sencillo para los fabricantes [9].

3. Logística inversa en el sector agropecuario en Uruguay

A continuación se describe la incidencia del sector agropecuario en Uruguay y en la normativa vigente para la recuperación de envases y productos en dicho sector.

3.1. Situación del sector agro en Uruguay

La economía de Uruguay ha crecido de manera ininterrumpida, con un incremento del 70 % en el ingreso per cápita, entre 2009 y 2019. El PIB de Uruguay mantiene una tendencia creciente desde 2003, mostrando un dinamismo notoriamente superior al de décadas anteriores [26].

El sector agropecuario y las cadenas agroindustriales tienen una participación clave en la economía, por lo que fueron un importante impulso del dinamismo antes mencionado. El sector agroindustrial representó un 11 % del PIB uruguayo en 2019. Dicha participación se repartió en partes similares entre el sector primario (agricultura, ganadería y silvicultura) y las industrias relacionadas con el agro, con 6 % y 5 % respectivamente [26].

En particular el PIB de “Agricultura, ganadería, caza y silvicultura” creció 2 % promedio anual entre 2002 y 2019. Dentro del sector agropecuario se destaca el dinamismo del sector agrícola liderado por el cultivo de la soja. Además, otros sectores como “Transporte, Almacenamiento y Comunicaciones”, también se encuentran fuertemente asociados al desarrollo del sector agropecuario y agroindustrial nacional [26].

Este crecimiento se debe en gran parte a productos de nutrición animal y vegetal. Su utilización aumenta la productividad de los suelos y del alimento animal, permitiendo el crecimiento sostenido de consumo de productos agroganaderos. Sin embargo, esta industria es reconocida por presentar grandes impactos ambientales, especialmente por el impacto que tienen los productos fitosanitarios sobre los suelos y cursos de agua. Igualmente, por lo general se desestima el impacto que tiene la producción, distribución y deshecho de los envases de los productos en sí.

El estudio de nuevas aplicaciones de logística inversa y remanufacturación o reutilización de envases podría ayudar a aminorar el impacto ambiental global de este sector tan presente en la industria uruguaya.

3.2. Normativa de recuperación en Uruguay

Uruguay cuenta con un marco legislativo específico para la temática. En particular, la Ley N° 19829 Aprobación de Normas para la Gestión Integral de Residuos acumula varias indicaciones y regulaciones. En su primer artículo, expone el objetivo de la misma, que consta de la protección del ambiente y la promoción de un modelo de desarrollo sostenible, mediante la prevención y reducción de los impactos negativos de la generación, el manejo y todas las etapas de gestión de los residuos y el reconocimiento de sus posibilidades de generar valor y empleo de calidad [21].

A su vez, la Ley 19829 expone varias definiciones de interés en su artículo número 3, incluyendo las definiciones de residuos, subproductos, reciclaje, reutilización, entre otros. En la misma, se tratan a los envases como productos especiales, obligando a distribuidores y comerciantes a recibirlos, y haciendo que sus materiales propicien la reutilización y reciclado o en su defecto, ser de materiales biodegradables [21].

Por otro lado, la gestión de residuos derivados del uso de productos químicos, biológicos y otros bienes en la actividad agropecuaria, hortofrutícola y forestal queda normalizado por el Decreto N° 152/013 Reglamentación de Ley 17.283 (Ley General de Protección del Medio Ambiente). Su artículo número 1 especifica la inclusión de todos los envases (primarios y secundarios) de productos químicos o biológicos utilizados en la producción vegetal en el Decreto [13].

Este Decreto también obliga en su artículo número 4 a toda persona física o jurídica que de cualquier forma intermedie o comercialice estos productos a manejar y disponer los bienes. También obliga a recibir envases del tipo de productos que comercializa funcionando como centro de recepción y asegurando

que los residuos recibidos, sean dirigidos a los centros de acopio y sigan los canales establecidos para su tratamiento y valorización, según el plan de gestión correspondiente[13].

Las empresas deben capacitar a su personal en la gestión ambientalmente adecuada de los productos químicos, biológicos, otros bienes o residuos a los que refiere el presente decreto. Deben participar en la difusión y distribución de información del o los planes que correspondan, y velar por la minimización de la generación de existencias obsoletas. En caso de poseerlas, deben entregarlas en la forma y condiciones que establezca el plan correspondiente[13].

El Decreto N° 152/013, en su artículo 5, obliga a los productores agropecuarios, hortifrutícolas y forestales, los aplicadores y en general toda persona física o jurídica, tenedora de productos químicos o biológicos utilizados en la producción vegetal a manejar y disponer esos bienes, así como sus residuos, de manera que no se afecte el ambiente, asegurando el cumplimiento de este reglamento. Obliga a capacitar a su personal en la gestión ambientalmente adecuada de los productos químicos, biológicos, otros bienes y residuos, y a descontaminar los envases vacíos de los productos, según lo que se establece en el decreto y lo que el fabricante, formulador o importador indique en aplicación del plan correspondiente[13].

Los productores también deben entregar los residuos de envases a un centro de recepción o de acopio que forme parte de un plan de gestión aprobado, y velar por minimizar la generación de existencias obsoletas, a través de un adecuado manejo de los productos y los stocks. La eventual generación de esas existencias, deberá ser comunicada por el productor, aplicador o tenedor de las mismas al titular del respectivo plan o a quien éste indique, para canalizarlos por las vías que correspondan[13].

El artículo 27 expone la necesidad de autorización de la Dirección Nacional de Medio Ambiente para las personas físicas o jurídicas que realicen tratamiento de lavado y descontaminación o reciclado de los envases o materiales de los envases descontaminados. Sin embargo, exceptúa de esa autorización a las operaciones de descontaminación (triple lavado) realizadas por los productores o aplicadores con el fin de recuperar del principio activo lo que aun se puede aplicar [13].

En el artículo 29 trata sobre el reuso de los envases. Sólo podrá proponerse para contener productos de similar uso en actividades de producción vegetal o animal, según corresponda. Para ello será condición que éstos sean previamente descontaminados. Prohíbe la utilización de envases de fitosanitarios para contener alimentos, líquidos o productos destinados al uso o consumo humano o animal [13].

3.2.1. Investigación de la gestión de envases

La normativa exployada anteriormente muestra la responsabilidad de los comerciantes y destruidores de hacerse cargo de sus envases al final de su vida útil y la obligación de recibirlos. También menciona el método del triple lavado y su habilitación para descontaminar los envases por parte de los productores.

Para asegurar la posibilidad de reutilización de envases de nutrición vegetal, se procedió a consultar con la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) sobre el tema. Según el técnico responsable de la implementación del Decreto N° 152/013, no existe un paquete de condiciones genéricas para todos los casos. Sin embargo, en el caso de envases que van a volver a contener los mismos productos que contuvieron inicialmente, es correcto aplicar el Decreto.

En reuso hay dos aspectos clave para definir el tratamiento: el impacto en la calidad de los productos que contendrán cuando sean reutilizados, y los aspectos ambientales.

Por la calidad de producto, la preocupación general es que la contaminación cruzada afecte la calidad de los productos, sobretodo cuando hay sustancias peligrosas de por medio. Los niveles máximos de contaminación dependen del fabricante. En el caso de mantener los envases dentro de los mismos productos, esta preocupación de discipa.

En cuanto a los aspectos ambientales, estos no serían los relacionados al nivel de restos de principio activo en el envase lavado sino de los procesos de lavado efluentes. El decreto acepta el triple lavado como mecanismo de descontaminación para que el envase sea considerado como no peligroso para reducir el riesgo en la manipulación y gestión del residuo. El triple lavado bien hecho reporta una remoción del 99.99 por ciento de los principios activos y podría utilizarse como criterio para eficiencia de lavado para el diseño de sistemas de lavado. El Decreto exime a los productores de tener aprobación de la DINAMA para realizar dicho lavado.

En conclusión, los envases de fertilizantes y bioestimulantes para la nutrición vegetal pueden ser reutilizados para contener sus mismos productos, utilizando el triple lavado por parte de los productores como desinfección.

Los envases de nutrición animal no son mencionados en el Decreto, por lo que no son abarcados por el mismo. Por lo tanto, se procedió a consultar con el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) sobre la posibilidad de reutilización de los mismos.

Se mantuvo un intercambio por mail y videollamada con dos personas relacionadas a esta temática en el MGAP. Comentaron que no se tiene normativa específica, pero sí sugerencias al respecto.

En primer lugar, se sugiere utilizar envases resistentes, que no se rajen. A no ser que se trate de un producto que impregne, productos que contengan harina de carne, o urea, la reutilización de envases de nutrición animal de rumiante para rumiante es correcta. El triple lavado es recomendado también para estos casos.

También se sugiere realizar un cuestionario a la persona que devuelve los envases, de manera de eliminar casos en que se hayan utilizado los envases para contener otros agentes que el producto inicial, como productos tóxicos, agroquímicos, pesticidas, etc. Se debe realizar también una inspección visual de lo recibido, de manera que no tenga nada adherido ni contenga tintes o manchas.

4. Caso de estudio: NutAgro

En esta Sección se presenta la información de la empresa con la que se trabajó a lo largo del proyecto de grado. Esta empresa existe en la realidad, pero se utiliza un nombre ficticio (NutAgro) por temas de confidencialidad. Se brinda una breve descripción y se mencionan aspectos relacionados a los procesos realizados en la planta, tanto productivos como logísticos. También se incluye el método de comercialización y distribución de sus productos. Por último, se menciona el convenio que la empresa tiene actualmente con “EcoCampo” (nombre ficticio), para el tratamiento de sus envases luego de su uso.

4.1. Descripción de la empresa

NutAgro es una empresa subsidiaria de Compañía Mundo (un nombre ficticio), conglomerado de agronegocios de origen extranjero, instalada industrialmente en Uruguay desde el año 2004. Cuentan con tres principales líneas de negocio: nutrición del suelo, nutrición animal y nutrición vegetal. A su vez, cada línea cuenta con una gama de soluciones para el agro, variando no solo sus recetas, sino también sus presentaciones al público.

Su centro productivo y logístico se encuentra en el interior del país, a cincuenta minutos de la ciudad de Montevideo. Desde allí se ejecutan las operaciones necesarias para hacer llegar sus productos al resto del país. Las bóvedas de su depósito permiten almacenar hasta doce mil toneladas de producto a granel. Por otro lado, cuentan con la capacidad de mantener un stock de tres meses de todos sus productos. Dicho centro productivo es el único de la empresa en Uruguay, ya que no cuenta con sucursales. Asimismo, el centro abastece a un pequeño mercado en otros países de América del Sur.

La amplia mayoría de sus productos son producidos y distribuidos desde el centro. Por tanto, el ciclo de todos los productos comienza con la planificación de la producción, su elaboración, envasado, almacenado y posterior distribución/envío hasta llegar al cliente. Los productos de nutrición animal y de suelo son elaborados en la planta. Sin embargo, los productos líquidos de nutrición vegetal son fraccionados únicamente, ya que se importan en tarrinas de mil litros.

4.2. Procesos productivos

La planta puede diferenciarse en tres sectores productivos, los cuales dependen de la línea de negocio que abastezcan. Estas son las siguientes:

Nutrición animal

- Minerales granulados
- Minerales en bloque

Nutrición vegetal

- Nutrientes granulados
- Bioestimulantes y fertilizantes líquidos

Nutrición del suelo

- Nutrientes granulados

Los productos granulados se procesan en líneas de producción independientes, dado que contienen materias primas distintas y se debe evitar la contaminación. De todas formas, la operativa de estos es bastante similar. Todos los productos granulados se envasan en bolsones de distintas presentaciones. En el caso de la nutrición animal, sus granulados se presentan en bolsas con capacidad de 20 o 25 kg. En el caso de nutrición vegetal y nutrición de suelo, los productos se empaquetan en bolsones de 600kg o en bolsas de 50kg.

En cuanto a los minerales en bloque, todos los productos son envasados en un único formato de piletas etiquetadas y cubiertas con nylon. Dicha presentación tiene una capacidad de 25 kg de producto, y esto significa un valor extra para el cliente. El motivo de ello es que su forma, peso y volumen facilita la operativa de los trabajadores en el campo. Además, su recolección ocupa poco volumen ya que las piletas pueden apilarse. La importancia del envase de los minerales en bloque implica que se mantengan determinados estándares de calidad en cuanto a la resistencia a la presión del producto y su exposición al sol. El actual proveedor de piletas es una empresa uruguaya, la cual ha adaptado sus envases a los requerimientos de NutAgro.

Por último, el proceso de envasado de productos líquidos consiste en fraccionar el líquido de las tarrinas en botellas de 1 litro, y bidones de 5 y 10 litros. Posteriormente, estos son consolidados en cajas, y luego son ordenadas en pallets para su posterior distribución.

4.3. Comercialización y distribución

NutAgro cuenta con asesores comerciales, quienes se contactan con los productores (clientes finales) con el fin de ofrecer los productos de NutAgro. A su vez, la empresa factura sus productos únicamente a intermediarios, ubicados en los distintos departamentos del país. Por ende, a pesar de que un comercial ofrezca los productos de NutAgro a un consumidor final, este último debe formalizar la compra a través de los intermediarios. Una vez concretada la venta, los operadores logísticos se encargan de hacer llegar el 100% de los pedidos a sus clientes, contemplando los menores costos y que la entrega sea lo más inmediata posible.

Por lo general, los productos de nutrición animal se envían a los distintos intermediarios, y luego este se encarga de hacerlos llegar a los clientes finales. Cuando los pedidos son muy grandes e implican bultos de un volumen considerable (como pueden ser los bolsones de 600 kg), estos son enviados directamente al cliente final desde la casa central. El abanico de opciones de distribución es muy variable, y la presentación del producto influye en la forma de envío.

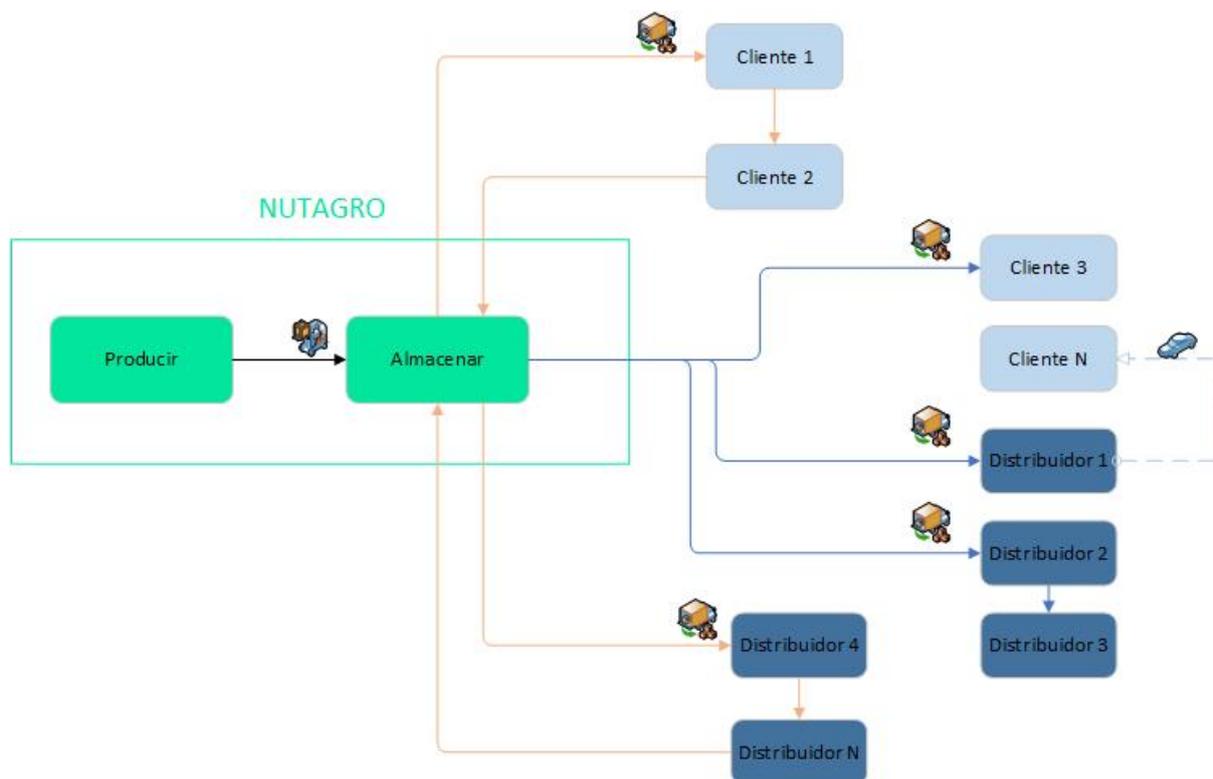
Para la distribución, NutAgro cuenta con tres alternativas de transporte distintas. En primer lugar, tienen un camión propio con capacidad de carga de 6 mil toneladas; este es utilizado para recorrer distancias cortas, o hacer llegar productos con alta rentabilidad a clientes más alejados. De todas formas, actualmente este camión se mueve únicamente al sur del río Negro.

Cuando los clientes se encuentran al norte del río Negro, los productos son necesariamente entregados con otro tipo de transporte, distinto al camión propio. Estos viajes pueden ser compartidos con otras empresas o exclusivos para NutAgro. Para dichos viajes se intentan aprovechar los viajes de “vuelta” de camiones tercerizados al norte del país, ya que estos últimos son los más económicos. Los pedidos de gran volumen a un único cliente suelen ser entregados con un viaje de camión tercerizado exclusivo.

Por otro lado, existe la alternativa de enviar productos por agencias de transporte. Esta es la alternativa más cara, por lo que se reserva únicamente para pedidos urgentes o productos muy rentables, como lo son los bioestimulantes y fertilizantes líquidos.

Es parte de la operativa logística determinar la ruta de viaje para visitar a los clientes y las distintas paradas a realizar dentro de un mismo viaje, tanto en el caso del camión propio, así como también los viajes tercerizados.

En la Figura 2 se presenta los flujos actuales de los distintos medios de transporte para entregar mercadería.



REFERENCIAS	
	Operación interna
	Cliente
	Distribuidor
	Recorrido de camión propio
	Recorrido de camión de agencia / tercerizado
	Recorrido de transporte externo

Figura 2: Producción y distribución actual de productos. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Asociación con EcoCampo

EcoCampo (nombre ficticio) es una asociación civil internacional, que inició sus actividades en Uruguay en el año 2013. Su objetivo es gestionar los envases de agroquímicos y fertilizantes luego de su uso, de forma de asegurar un final seguro de éstos. Para lograrlo, mantiene asociaciones con distintos actores del sector agropecuario, siendo NutAgro uno de estos. La empresa le paga a EcoCampo un determinado monto mensual, y delega sobre ellos la gestión de los envases y piletas de sus productos de las líneas vegetal y animal.

La operativa de EcoCampo consiste en recibir dichos envases y piletas de los consumidores finales con un triple lavado en sus Centros de Acopio, para su posterior reciclaje.

5. Planificación de la producción y distribución de la producción sin opciones de retorno

En esta Sección se diseña un modelo matemático basado en la planta descrita en la Sección 4, con el objetivo de estudiar la situación económica y ambiental actual de la empresa.

Se aborda un problema de planificación de la producción y distribución de la producción a corto plazo de una industria uruguaya. Como se mencionó en la Sección 4, se trata de una planta multi-producto. En este proyecto, se contemplarán únicamente las líneas de negocio de nutrición animal y vegetal, y las líneas de producción correspondientes cuyos envases son reutilizables. De esta manera, se excluyen los bolsones.

Inicialmente se aborda el problema de planificación de la producción, en el cual la demanda se puede pronosticar con un alto grado de certeza según el histórico de ventas de NutAgro. Los resultados de las cantidades producidas obtenidos en este modelo inicial se consideran como insumo para abordar el problema logístico de distribución de la producción. En este último, la demanda está determinada por los pedidos de los clientes realmente recibidos en la empresa, por lo que puede diferir respecto al modelo de planificación de producción.

La empresa produce a contra stock y planifica la producción con el objetivo de tener un stock para tres meses. Por esta razón, la planificación de la producción y la distribución de la producción son modelos separados. Mientras que el modelo de planificación considera una estimación de la demanda de mediano plazo de la demanda, la demanda del modelo logístico considera los pedidos realmente realizados por los clientes en cada horizonte de planificación semanal.

5.1. Problema de Planificación de la producción

Se busca determinar una planificación de producción de cada producto en un horizonte temporal semanal con definiciones diarias. La cantidad a producir en cada período diario varía entre cero y la capacidad máxima de la línea, considerando el pronóstico de demanda según datos históricos de venta.

Este problema de planificación de la producción multi-producto se representa como un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) y el modelo que lo representa fue creado a partir del análisis y los datos proporcionados por la empresa. A continuación, se detallan las principales características y supuestos del modelo.

Adquisición de materia prima: El proceso de compra de materia prima no se tiene en cuenta en este modelo, sino que se asume que se cuenta con las cantidades necesarias para la producción.

Líneas de producción: Este problema considera dos líneas de producción, una destinada para nutrición animal de minerales en bloque y la otra para la producción de nutrición vegetal de productos líquidos, por lo que cada artículo se puede producir en una única línea. A su vez, son líneas de producción independientes, lo que permite que sean utilizadas en simultáneo en cada período.

Capacidad de la producción: La capacidad de producción de cada línea depende de su infraestructura. La cantidad de productos producidos pertenecientes a cada línea en cada período no puede superar la capacidad máxima de esta.

Capacidad de almacenamiento: Dadas las características del depósito de la empresa, la capacidad de almacenamiento en los depósitos se considera ilimitada.

Costo de EcoCampo: Actualmente NutAgro realiza un pago a EcoCampo variable por mes con el objetivo de gestionar los envases de sus productos. Sin embargo, no se cuenta con la información precisa de la razón del valor de este costo. Dado que esta tarifa varía cada mes, se toma la hipótesis de que es un costo que depende directamente de la cantidad vendida de cada producto.

5.1.1. Formulación del Modelo Matemático

OBJETIVO

El objetivo es determinar las cantidades a producir de cada producto en cada período durante el horizonte de planificación, produciendo las cantidades pronosticadas de venta y minimizando la sumatoria de los costos asociados a la producción y preparación de producir ciertos productos.

CONJUNTOS

NA : Productos pertenecientes a la línea de nutrición animal.

NV : Productos pertenecientes a la línea de nutrición vegetal.

P : Unión de productos de nutrición animal y vegetal, con subíndice p .

T : Períodos (días) de planificación con subíndice t . Toma valores entre 1 y $J=|T|$.

T' : $\{0\} \cup T$.

PARÁMETROS

J : Horizonte de planificación.

D_p : Pronóstico de demanda del producto p considerado para la planificación de la producción.

c_p : Costo de producción por unidad del producto p , considerando costo de materia prima y operación.

c_p^n : Costo por unidad del envase del producto p , incluyendo la tarifa asociada al tratamiento del envase por EcoCampo.

k_p : Costo fijo de preparación de la producción del producto p .

I_p : Stock inicial del producto p en el período $t=0$.

B_p^M : Conversión de unidades a masa del producto p .

B_p^V : Conversión de unidades a volumen del producto p .

Q_t^{na} : Capacidad de producción en toneladas de la línea de nutrición animal en el período t .

Q_t^{nv} : Capacidad de producción en litros de la línea de nutrición vegetal en el período t .

B : Número de activación de la variable binaria δ_{pt} , el cual se determina a partir de la capacidad máxima de producción.

VARIABLES DE DECISIÓN

x_{pt} : Cantidad de unidades a producir del producto p en el período t .

y_{pt} : Cantidad de unidades a stockear del producto p en el período t .

$\delta_{pt} \in \{0, 1\}$: Vale 1 cuando se produce un producto p en el período t , 0 de lo contrario.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

$$\min \sum_{p,t} ((c_p + c_p^n)x_{pt} + k_p\delta_{pt}) \quad (6)$$

Sujeto a:

$$y_{pt} = y_{p,t-1} + x_{pt}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$y_{p0} = I_p, \quad \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{p \in NA} (B_p^M x_{pt}) \leq Q_t^{na}, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{p \in NV} (B_p^V x_{pt}) \leq Q_t^{nv}, \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_t (x_{pt}) \geq D_p, \quad \forall p \in P \quad (11)$$

$$x_{pt} \leq B\delta_{pt}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$\delta_{pt} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$x_{pt}, y_{pt} \geq 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

La función objetivo (6) se define como la minimización de costos asociados a la producción y preparación de producir cierto producto. Las restricciones (7) definen al inventario a almacenar luego de producir cada producto en cada período, mientras que las restricciones (8) inicializan el inventario de los distintos productos. Las restricciones (9) y (10) representan las limitaciones de la capacidad de producción según cada línea, en toneladas y litros respectivamente. Las restricciones (11) garantizan que la cantidad producida sea al menos la demanda pronosticada. Las restricciones (12) corresponden a la activación de la variable binaria asociada a la producción. Por último, las restricciones (13) y (14) determinan los dominios de las variables.

5.2. Problema de distribución de la producción

En este problema, se busca determinar la distribución de la producción, definiendo las entregas a los clientes en un horizonte semanal con definiciones diarias. De esta forma, se decide la cantidad a entregar a qué cliente, en que período y con qué medio de transporte, de forma de minimizar los costos.

Al igual que el problema de la Sección 5.1, la satisfacción de la demanda se modela como un MILP a partir del análisis y datos proporcionados por la empresa. Este modelo considera ciertas características y restricciones, las cuales se detallan a continuación.

Alcance del modelo: Como se mencionó en la Sección 4, se trata de una planta ubicada en el interior de Canelones, Uruguay. Si bien la empresa tiene clientes en otros países dentro de América del Sur, el alcance de este modelo contempla únicamente a los nacionales.

Stock suficiente para abastecer la demanda: El modelo de producción de la Sección 5.1 tiene una demanda que busca satisfacer un nivel de inventario que en los datos se corresponde a las ventas de tres meses. Por otro lado, la demanda del modelo de distribución de la producción está determinada por los pedidos semanales de los clientes. Por esta razón, se parte de la hipótesis que en el problema logístico de distribución de la producción siempre se cuenta con stock disponible para abastecer completamente la demanda.

Capacidad limitada de los camiones: Como se mencionó en la Sección 4, la empresa cuenta con tres alternativas distintas de transporte. Cada alternativa representa a camiones con capacidades finitas distintas.

Restricción en la definición de viajes: La definición de los viajes determina que, dentro de un mismo viaje, solo es posible visitar a un nodo.

Limitación de cantidad de viajes por camión: Los camiones tercerizados y de agencia pueden realizar un único viaje por día. El camión propio de la empresa es el único medio de transporte habilitado a realizar una cantidad de viajes por día mayor a uno. Este valor está determinado por el parámetro L del modelo. No es posible que un cliente sea visitado por el mismo camión en un mismo día.

Penalización en la entrega tardía de los pedidos a los clientes: NutAgro considera que la distribución de la producción de los clientes a tiempo es un aspecto muy importante. Por esta razón, en el problema se considera un costo de entrega tardía de los pedidos con el objetivo de modelar esta penalización y planificar correctamente los viajes de entrega.

Disponibilidad infinita de camiones: Dada la realidad de distribución de la empresa, siempre se cuenta con camiones disponibles para cumplir con la demanda. El modelo deberá determinar cuándo enviar y con qué medio de transporte, evaluando los costos del camión propio, de camiones tercerizados o de agencia, y del costo asociado a no cumplir con la demanda en el período solicitado.

Limitación del alcance de entrega del camión propio: Dado que el camión propio puede realizar más de un viaje por día, solo puede visitar a clientes cercanos para poder modelar una jornada laboral.

Cumplimiento total de los pedidos de clientes: Por política de la empresa, se debe satisfacer la totalidad de la demanda de los clientes en la semana.

5.2.1. Formulación del Modelo Matemático

OBJETIVO

El objetivo consiste en determinar la cantidad de cada producto que se entregará en la visita a cada cliente, con qué medio de transporte, en cada período de tiempo durante un horizonte de planificación semanal, con el objetivo de minimizar los costos de la empresa. Se consideran los distintos costos de visitar a un cliente con cada medio de transporte en caso de que corresponda y, por política de la empresa, un costo asociado a la entrega tardía de los pedidos de los clientes.

CONJUNTOS

P : Productos con subíndice p .

T : Períodos (días) de planificación con subíndice t . Toma valores entre 1 y $J=|T|$.

T' : $\{0\} \cup T$.

VP : Camiones propios.

VT : Camiones tercerizados.

VA : Camiones de agencia.

V : Representa la unión de los conjuntos de camiones propios, tercerizados y de agencia, con subíndice v .

N : Clientes con subíndice n , incluyendo la planta de la empresa, los clientes y distribuidores.

PARÁMETROS

J : Horizonte de planificación.

d_{npt} : Demanda del cliente n , del producto p en el período t .

c_n^{vp} : Costo fijo de visitar al cliente n con el camión propio.

$c^{va,f}$: Costo fijo de utilizar un camión de agencia.

$c^{va,v}$: Costo por tonelada de utilizar un camión de agencia.

c_n^{vt} : Costo por tonelada de enviar un producto al cliente n con un camión tercerizado.

cf_p : Costo por unidad de producto p de generar retrasos en las entregas.

I_p : Stock inicial del producto p en el período $t=0$.

L : Cantidad máxima de visitas que puede hacer el camión propio por período.

$Q^{vp,v}$: Capacidad volumétrica del camión propio.

$Q^{vp,m}$: Capacidad másica del camión propio.

$Q^{va,v}$: Capacidad volumétrica del camión de agencia.

$Q^{va,m}$: Capacidad másica del camión de agencia.

$Q^{vt,v}$: Capacidad volumétrica del camión tercerizado.

$Q^{vt,m}$: Capacidad másica del camión tercerizado.

B_p^V : Conversión de unidades a m^3 del producto p .

B_p^M : Conversión de unidades a toneladas del producto p .

N^{max} : Cota superior (máximo) del conjunto de clientes que no puede visitar el camión propio.

N^{min} : Cota inferior (mínimo) del conjunto de clientes que no puede visitar el camión propio.

VARIABLES DE DECISIÓN

y_{pt} : Cantidad de unidades a almacenar del producto p en el período t .

$z_{nvt} \in \{0, 1\}$: Vale 1 en caso de visitar al cliente n , con el camión v , en el período t ; y es 0 de lo contrario.

w_{pnot} : Cantidad a entregar del producto p , al cliente n con el camión v en el período t .

b_{pnt}^1 : Cantidad de producto p entregados en exceso al cliente n en el período t .

b_{pnt}^2 : Cantidad de producto p con retraso de entrega al cliente n en el período t .

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{n, vp, t} (c_n^{vp} z_{nvt}) + \sum_{n, va, t} (c^{va, f} z_{nvt}) + \sum_{n, p, va, t} (c^{va, v} B_p^M w_{pnvt}) + \\ & \sum_{n, p, vt, t} (c_n^{vt} B_p^M w_{pnvt}) + \sum_{p, n, t} (c_{fp} b_{pnt}^2) \end{aligned} \quad (15)$$

Sujeto a:

$$y_{pt} = y_{p, t-1} - \sum_{n, v} (w_{pnvt}), \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$y_{p0} = I_p, \quad \forall p \in P \quad (17)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) \leq Q^{vp, v} z_{nvt}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_p (B_p^M w_{pnvt}) \leq Q^{vp, m} z_{nvt}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) \leq Q^{va, v} z_{nvt}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VA, \quad \forall t \in T \quad (20)$$

$$\sum_p (B_p^M w_{pnvt}) \leq Q^{va, m} z_{nvt}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VA, \quad \forall t \in T \quad (21)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) \leq Q^{vt, v} z_{nvt}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VT, \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$\sum_p (B_p^M w_{pnvt}) \leq Q^{vt, m} z_{nvt}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VT, \quad \forall t \in T \quad (23)$$

$$\begin{aligned} d_{npt} - \sum_v w_{pnvt} + b_{pnt}^1 - b_{pn, t-1}^1 + \\ b_{pn, t-1}^2 - b_{pnt}^2 = 0, \end{aligned} \quad \forall n \in N, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in 1..T \quad (24)$$

$$\sum_{vt} (w_{pnvt}) = \sum_t (d_{npt}), \quad \forall p \in P, \quad \forall n \in N \quad (25)$$

$$z_{nvt} \leq \sum_p (w_{pnvt}), \quad \forall v \in V, \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{nv} (w_{pnvt}) \leq y_{p, t-1}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (27)$$

$$\sum_n (z_{nvt}) \leq 1, \quad \forall v \in \{VA \cup VT\}, \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$\sum_n (z_{nvt}) \leq L, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$z_{nvt} = 0, \quad \forall t \in T, \quad \forall n \in [N^{min}, N^{max}], \quad \forall v \in VP \quad (30)$$

$$w_{pnvt}, y_{pt}, b_{pnt}^1, b_{pnt}^2 \geq 0, \quad \forall n \in N, \quad \forall p \in P, \quad \forall v \in V, \quad \forall t \in T \quad (31)$$

$$z_{nvt} \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in V, \quad \forall t \in T \quad (32)$$

Como se muestra en (15), la función objetivo se define como la minimización de costos de la empresa. Estos incluyen costos de visitar a los clientes, dependiendo de la ubicación de estos y la cantidad de producto entregado. Las restricciones (16) y (17) se refieren al balance de inventario e inicialización del mismo. Desde las restricciones (18) a la (23) se plasman la activación de las variables binarias de viajes dadas la capacidades volumétricas y másicas de los distintos camiones. Las restricciones (24) determinan las entregas atrasadas y adelantadas en cada período. Las restricciones (25) obligan a llevar a un cliente la cantidad de producto que se pide. Las restricciones (26) impiden que la variable binaria z_{not}^v tome valores positivos cuando no se lleva productos a los clientes. Las restricciones (27) limitan la cantidad a entregar de cada día según el stock final del día anterior. Las restricciones (28) y (29) acotan las visitas de cada camión por día. Las restricciones (30) impiden que el camión propio visite a los clientes más alejados. Por último, las restricciones (31) y (32) determinan los dominios de las variables.

5.3. Validación de los modelos

Una vez finalizada la construcción del modelo se procede a la validación del mismo, con el objetivo de verificar que el modelo represente la realidad deseada.

5.3.1. Planificación de la producción

Para realizar la validación de este modelo, se consideran conjuntos reducidos de datos. Se considera un máximo de 3 períodos y 3 productos distintos, dos pertenecientes a la línea de producción animal y un producto de la línea de producción vegetal. Los casos a probar se determinan con el objetivo de validar el funcionamiento correcto del modelo con respecto a las restricciones y a la función objetivo. Para esto, se procede a validar:

- Producción nula en caso de que no exista demanda.
- Restricciones de capacidad de producción frente a un exceso de demanda.
- Definición de las líneas de producción y la relación de productos pertenecientes a cada una.
- Restricciones de producción frente a diversos escenarios de demanda.

Estas pruebas de validación se encuentran en la Sección Anexo 2: Validación de los modelos, donde se reportan todos los casos de validación realizados.

A continuación, se detallan ciertas validaciones relevantes. Es importante mencionar que se presentan las tablas de los valores de parámetros más influyentes en cada caso.

Caso 1: Definición de las líneas de producción y la relación de productos pertenecientes a cada una

Durante esta validación, se analizó la correcta ejecución de la producción, en donde se prueba la restricción que asocia los productos a cada línea de producción a la que pertenecen.

Para ello, se consideró la capacidad de producción de la línea de nutrición animal igual a la demanda de sus productos, y una capacidad de la línea de nutrición vegetal mayor a su demanda. Era esperable que el resultado del modelo contenga la cantidad de producción de cada producto igual a su demanda.

Elementos de los conjuntos

Nombre del conjunto	Datos ingresados del conjunto
P	1, 2, 3

Tabla 1: Definición de productos - Planificación de la producción: Caso 1.

Nombre del conjunto	Datos ingresados del conjunto
NA	1, 2
NV	3

Tabla 2: Definición de líneas de producción - Planificación de la producción: Caso 1.

Valores de parámetros

Nombre de producto	Demanda
1	10
2	10
3	10

Tabla 3: Demanda pronosticada - Planificación de la producción: Caso 1.

Nombre de producto	Conversión
1	1
2	1

Tabla 4: Conversión de unidades a masa de cada producto de nutrición animal - Planificación de la producción: Caso 1.

Nombre de producto	Conversión
3	1

Tabla 5: Conversión de unidades a volumen de producto de nutrición vegetal - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Capacidad
1	5
2	5
3	10

Tabla 6: Capacidad másica por período de producción de la línea de nutrición animal - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Capacidad
1	5
2	5
3	5

Tabla 7: Capacidad volumétrica de producción de la línea de nutrición vegetal - Planificación de la producción: Caso 1.

Solución obtenida

Cómo se puede observar en los datos de los parámetros ingresados, la suma de las capacidades de producción en todos los períodos de cada línea es mayor o igual a la demanda de los productos pertenecientes a cada una. Como era de esperar, la solución obtenida que se puede visualizar en las tablas desde la 8 hasta la 10, sugiere la producción de cada producto en cantidades iguales a la demanda. Por esta razón, se puede concluir que la relación de los productos a las líneas de producción se encuentra correctamente definida en el modelo.

Período	Cantidad a producir
1	5
2	5
3	0

Tabla 8: Cantidad producida del producto 1 - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	0
2	0
3	10

Tabla 9: Cantidad producida del producto 2 - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	5
2	5
3	0

Tabla 10: Cantidad producida del producto 3 - Planificación de la producción: Caso 1.

5.3.2. Distribución de la producción

Para realizar la validación de este modelo, se consideran conjuntos reducidos de datos. Se considera un máximo de tres períodos, tres productos distintos, seis camiones y cinco clientes. Los casos a probar se determinan con el objetivo de que las distintas funcionalidades del modelo sean validadas. Para esto, se procede a validar:

- Restricciones de entrega de producto frente a una demanda mayor al stock.

- Restricciones de capacidad de traslado de mercadería.
- Cantidad nula de viajes de entrega en caso de que no exista demanda.
- Correcto comportamiento de los viajes de cada camión para entregar mercadería.
- Restricciones de capacidad de los camiones.
- Capacidad de entregar un pedido con camiones distintos debido a que excede la capacidad de los camiones.

Estas pruebas de validación se encuentran en la Sección Anexo 2: Validación de los modelos, donde se documentan los casos utilizados para la validación de este modelo. Cabe aclarar que otras pruebas del modelo fueron realizadas durante la etapa de construcción del mismo.

En esta Sección se detallan ciertas validaciones relevantes, las cuales exigieron la realización de cambios en el modelo. Es importante mencionar que se presentan las tablas de los parámetros más influyentes.

Caso 1: Restricciones de entrega de producto frente a una demanda mayor al stock

Esta validación se realizó con el propósito de analizar la correcta ejecución del balance de stock, en donde se valida que la cantidad disponible para entregar dependa del stock de los productos.

Esta validación se construyó sobre una versión previa del modelo donde los modelos de planificación de la producción y distribución de la producción se alimentaban diariamente dentro de un mismo horizonte de planificación. Es decir, las soluciones de las variables de la producción para determinado período, eran parámetros de entrada en el modelo de satisfacción de demanda en el mismo período. Por esta razón, la restricción del balance de inventario en el modelo de distribución de la producción se describía de la siguiente manera:

Definición de parámetros

param $m_{p,t}$ Cantidad producida del producto p en el período t .

Restricción de balance de inventario

$$y_{t,p} = y_{t-1,p} + m_{p,t} - \sum_{n,v} w_{pnvt}$$

Para realizar la validación, se consideró una demanda del producto 1 mayor a la suma del stock de mercadería a enviar. En un principio se esperaba que el modelo no encuentre solución factible. A continuación, se presentan los datos ingresados de parámetros relevantes:

Datos ingresados de los parámetros

Cantidad producida del producto 1 en el período 1.	40
--	----

Tabla 11: Cantidad producida del producto 1 - Distribución de la producción: Caso 1.

Stock inicial	10
---------------	----

Tabla 12: Stock inicial del producto 1 - Distribución de la producción: Caso 1.

Cliente	Demanda
1	10
2	150
3	0
4	50
5	0

Tabla 13: Demanda del producto 1 - Distribución de la producción: Caso 1.

Porcentaje total de la demanda a satisfacer.	90 %
--	------

Tabla 14: Porcentaje de demanda a satisfacer - Distribución de la producción: Caso 1.

Solución obtenida

Si bien se esperaba que el modelo no encuentre solución factible ya que el stock de mercadería disponible para enviar era menor al porcentaje de demanda a satisfacer, se obtuvo una solución en donde la cantidad entregada era menor al porcentaje de la demanda. Sin embargo, esta solución es correcta, debido a que la restricción que obliga a satisfacer cierto porcentaje de la demanda toma en cuenta la demanda de todos los productos en todos los períodos, cumpliendo esta restricción.

Sin embargo, a partir de esta validación se notó que la operativa que representa el modelo no es acorde a la operativa de la empresa, la cual estipula que los productos realicen una cuarentena antes de ser enviados. Por ejemplo, en el período 1, el stock inicial del producto 1 es de 10 unidades, la producción es de 40 unidades y, como se puede observar en la Tabla 15, se envían 50 unidades.

Cliente	Cantidad entregada
1	30
2	0
3	0
4	20
5	0

Tabla 15: Cantidad entregada del producto 1 en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 1.

A partir de esta validación, se cambió el modelo. Dentro de un mismo horizonte temporal, los modelos de producción y distribución son independientes. Por esta razón, la restricción del balance de inventario se modificó a la siguiente ecuación:

Última versión de la restricción de balance de inventario

$$y_{t,p} = y_{t-1,p} - \sum_{n,v} w_{pnt}$$

A su vez, se agregó una restricción que evalúe la cantidad de inventario disponible antes de entregar mercadería. La restricción agregada fue la siguiente:

$$\sum_{n,v} w_{pnt} \leq y_{t-1,p}$$

Por último, se modificó la restricción que limitaba el cumplimiento de un porcentaje de la demanda, con el propósito de representar el objetivo de la empresa y cumplirla en su totalidad.

$$\sum_{vt} (w_{pnt}) = \sum_t (d_{npt})$$

Caso 2: Restricciones de entrega de producto

A partir de esta validación, se comprobó que el modelo anterior no representaba correctamente la decisión estratégica que la empresa tiene para distribuir la demanda. Es decir, los resultados asociados a la entrega de la mercadería no tienen en cuenta la importancia de los plazos de entrega y retrasos en el cumplimiento de los pedidos.

Para realizar esta validación, se consideraron los siguientes valores para los parámetros.

Valores de parámetros

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 16: Demanda de cada cliente por producto en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 17: Demanda de cada cliente por producto en el período 2 - Distribución de la producción: Caso 2.

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 18: Demanda de cada cliente por producto en el período 3 - Distribución de la producción: Caso 2.

Camión	Capacidad
Camión propio	1

Tabla 19: Capacidad volumétrica del camión propio - Distribución de la producción: Caso 2.

Producto	Conversión
1	0.25
2	0.05
3	0.05

Tabla 20: Conversión volumétrica de cada producto - Distribución de la producción: Caso 2.

Cantidad máxima de viajes a distintos clientes por día del camión propio	3
--	---

Tabla 21: Cantidad máxima de viajes del camión propio - Distribución de la producción: Caso 2.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cliente	Cant. entregada producto 1	Cant. entregada producto 2	Cant. entregada producto 3
1	0	2	0
2	0	6	6
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

Tabla 22: Entregas a cada cliente en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.

Cliente	Cant. entregada producto 1	Cant. entregada producto 2	Cant. entregada producto 3
1	4	0	0
2	2	0	0
3	4	5	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

Tabla 23: Entregas a cada cliente en el período 2 - Distribución de la producción: Caso 2.

Cliente	Cant. entregada producto 1	Cant. entregada producto 2	Cant. entregada producto 3
1	2	4	6
2	4	0	0
3	2	1	6
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

Tabla 24: Entregas a cada cliente en el período 3 - Distribución de la producción: Caso 2.

Como se puede observar desde las tablas de resultados 22 hasta 24, la solución del modelo indica que en el período 1 se entregue toda la demanda de los productos 2 y 3 del cliente 2; y al cliente 3 se le entregue mercadería recién en el período 2. Es decir, a pesar de que todos los clientes tenían demanda en el período 1, se decidió no cumplir con los pedidos.

Por esta razón, se consideró necesario agregar los siguientes parámetros y restricción, donde se define el retraso de entrega de los pedidos a los clientes:

Definición de parámetros

param b_{pnt}^1 : Cantidad de producto p entregados en exceso al cliente n en el período t .

param b_{pnt}^2 : Cantidad de producto p entregados con retrasos de entrega al cliente n en el período t .

param cf_p : Costo por unidad de producto p de generar retrasos en las entregas.

Restricción de backlog

$$d_{ntp} - \sum_v w_{pnt} + b_{pnt}^1 - b_{pn,t-1}^1 + b_{pn,t-1}^2 - b_{pn,t}^2 = 0$$

También es necesario agregar el siguiente término en la función objetivo, para contabilizar un costo asociado a la falta de cumplimiento del pedido de un cliente:

$$\sum_{pnt} cf_p b_{pnt}^2$$

Caso 3: Definición de la variable binaria que representa si cada camión realiza un viaje a algún cliente

A partir de esta validación, se comprobó que el modelo anterior no tenía definido correctamente la variable binaria que representa si un camión visita a un cliente. Es decir, la variable binaria del viaje de un camión a un cliente tomaba valores positivos, sin embargo, la cantidad de mercadería enviada por ese camión a ese cliente era nula para el mismo período.

Para realizar esta validación, se consideraron los siguientes valores de los parámetros:

Valores de parámetros

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	0	0	0
2	20	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 25: Demanda en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 3.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cliente	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5	Camión 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

Tabla 26: Variable binaria que representa los viajes en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 3.

Cliente	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5	Camión 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	10	0	0	0	10
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

Tabla 27: Cantidad de mercadería enviada del producto 1 en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 3.

Como es posible observar desde las tablas de resultados 26 hasta 27, la variable binaria que representa si se realiza el viaje de determinado camión a cada cliente toma valores positivos, a pesar de que la variable que representa la cantidad enviada de mercadería a cada cliente sea nula.

Por esta razón, se consideró necesario agregar la siguiente restricción, que limita la positividad de la variable binaria de visita de los camiones a un cliente para los casos en que no se entrega mercadería:

$$z_{nvt} \leq w_{pnt}$$

6. Planificación de la producción y distribución de la producción con opciones de retorno

Una vez modelada la planificación de la producción y la distribución de la producción en la situación actual de la empresa, se procedió a estudiar ambos problemas con la recuperabilidad de los envases entregados a los clientes con el objetivo de reutilizarlos.

6.1. Diseño del sistema de recuperación de envases

Al igual que en los modelos de la Sección 5, en el diseño se considera únicamente los productos y líneas de producción de nutrición animal y vegetal.

Actualmente, la operativa de NutAgro contempla la compra y recepción de envases nuevos, planifica la producción, realiza los procesos de elaboración, almacena los productos terminados y los distribuye. Una vez que los clientes utilizan los productos, les deben realizar un triple lavado a los envases y transportarlos a EcoCampo, empresa encargada de gestionar el reciclaje de los envases.

El problema abordado en esta Sección considera, a su vez, la recuperación de los envases. Para ello, se pretende que los clientes consumidores de los productos realicen una primera evaluación de si el envase se encuentra en condiciones de ser recuperados o no. En caso de que sea posible, los clientes deberán realizar un triple lavado de cada envase y arrimarlos al distribuidor seleccionado como centro de recolección pertenecientes a su zona. De esta manera, los productores continuarían con un comportamiento muy similar al actual, sin implicar mayores esfuerzos.

Una vez recolectados los envases desde estos centros de recolección, estos son llevados a la planta de la empresa, en donde se analiza nuevamente cada envase para determinar si es posible reutilizarlo. De ser así, se les realiza una segunda limpieza más superficial y se almacenan en el depósito de insumos junto a otros envases nuevos, con el objetivo de que queden disponibles para utilizar en producción. Este proceso se puede observar en la Figura 3.

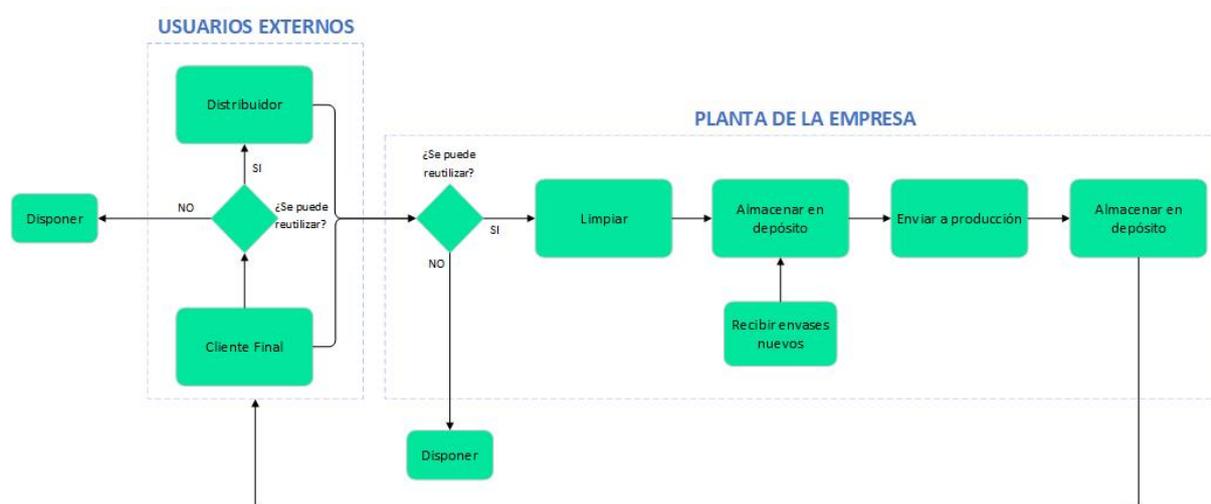


Figura 3: Flujo de recuperación de envases. Fuente: Elaboración propia.

Cómo se mencionó en la Sección 4.3, NutAgro cuenta con tres alternativas de transporte distintas para la entrega de productos: un camión propio de la empresa, camiones de agencia o viajes de “vuelta” de camiones de terceros al Norte del país.

El flujo de recuperación de envases se diseñó de tal forma que, luego de que los productores realicen el triple lavado en sus predios, aproximen los envases a los puntos seleccionados como centros de colección cercanos a su zona. Desde estos puntos, los tres tipos de transporte podrán recolectar los envases y trasladarlos a la planta de NutAgro, como se puede observar en la Figura 4.

Por un lado, el camión propio visitará a los clientes que se comportan como centros de colección para entregar mercadería, por lo que el retorno de envases no tendría ningún costo adicional. Por otro lado, debido a que el camión propio no alcanza a los clientes ubicados lejos de la planta, se debe poder recolectar con otro tipo de transporte. Por esta razón, se ponen a disposición camiones de agencia y tercerizados para levantar envases en los centros de acopio y trasladarlos a la planta de NutAgro. Estos viajes serán independientes de los viajes de ida de entrega de productos, por lo que tendrán costos adicionales.

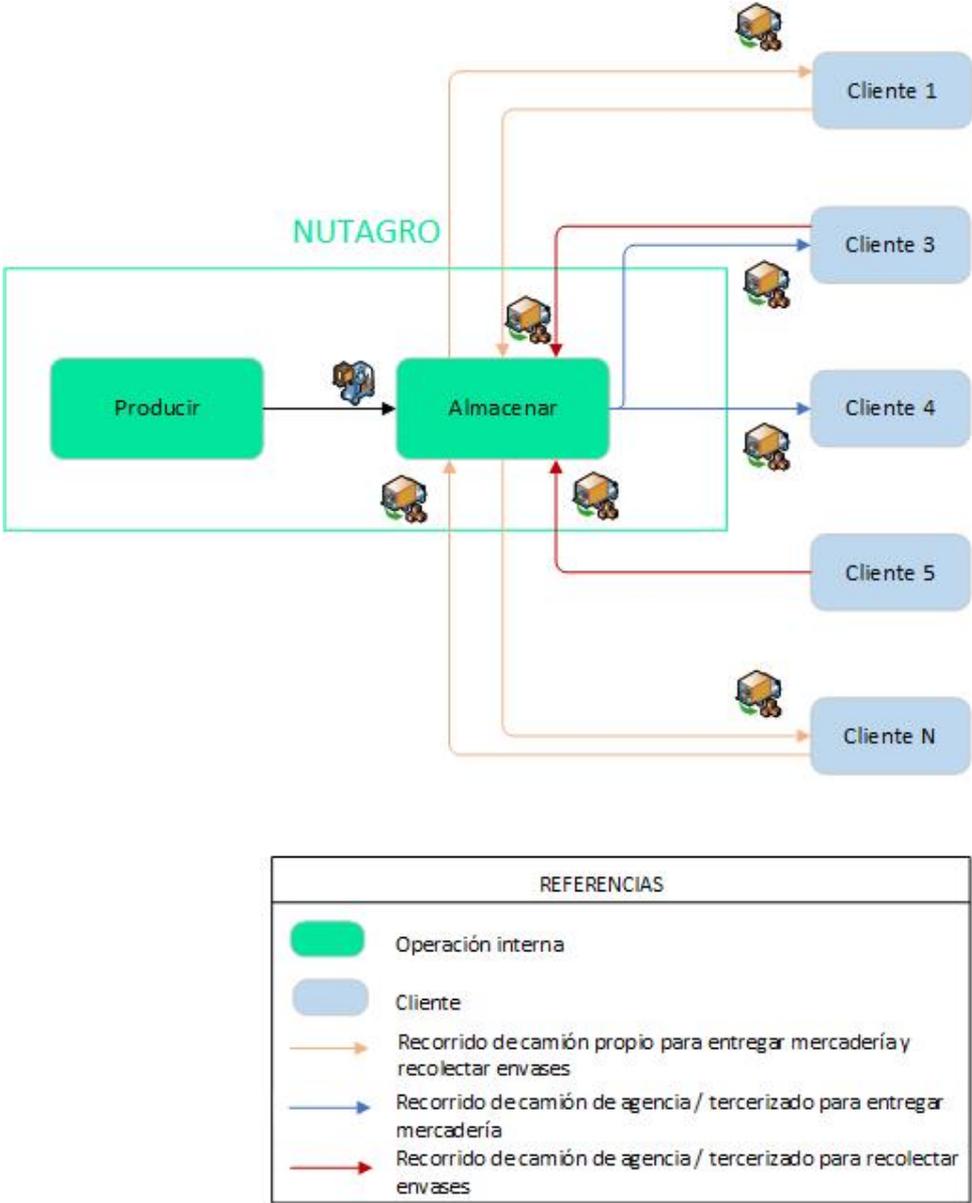


Figura 4: Producción, distribución y recolección de productos. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Problema de Planificación de la producción

Se busca determinar una planificación de la producción de cada producto en un horizonte temporal semanal con definiciones diarias. En líneas generales, las definiciones del modelo son iguales a las mencionadas en el problema de planificación de la producción de la Sección 5.1, por lo que se consideran las mismas hipótesis y restricciones. A continuación, se detallan las principales características específicas para el modelo de planificación de la producción con opciones de retorno.

Relación entre productos y envases: El modelo productivo no trabaja con un conjunto de envases, sino que trabaja a nivel de producto. Se asume que para cada producto existe un tipo de envase distinto. Dentro de las variables de decisión de producción, se distingue entre la producción con envases nuevos y con envases reutilizados. Sí se trabaja con un parámetro de stock inicial de envases que representa el número máximo de productos con envases nuevos que se pueden producir.

Definición de envases considerados: Los modelos con recuperación de envases consideran únicamente los envases de bidón y pileta para los productos de nutrición vegetal y animal según corresponda. Dentro del alcance de los modelos quedan excluidas las tapas, etiquetas, y otros insumos utilizados en el proceso de envasado y preparación de pedidos.

Control de calidad de los envases recuperados: Como se mencionó en la Sección 6, el flujo de retorno de los envases desde los clientes a la planta considera dos controles de calidad: uno realizado en el centro de recolección previo a ser recolectado, y otro en la planta cuando se reciben los envases. Es importante aclarar que estos controles de calidad no se definieron específicamente como parámetros en los modelos, pero sí son considerados como stock inicial en los centros de recolección, y como cantidad de envases recolectados recibidos en planta.

Stock inicial de envases disponible para recuperar: En cada horizonte de planificación semanal de la producción el modelo considera un único stock inicial de envases recuperados. No tiene en cuenta los envases que son recuperados durante dicho horizonte de planificación.

Limpieza de los envases recuperados en planta: Si bien los productores deben entregar los envases en los centros de colección con un triple lavado, este modelo considera una limpieza adicional de los envases en la planta de NutAgro previo a ser utilizados como insumo. Por lo tanto, se imputa un costo de recuperación a los productos utilizados con envases recuperados. Se asume que este costo es igual para todos los productos.

6.2.1. Formulación del Modelo Matemático

OBJETIVO

El objetivo es determinar las cantidades a almacenar y producir de cada producto en cada período durante un determinado horizonte de planificación, de forma tal que se minimicen los costos y el impacto ambiental de la empresa. Se consideran los costos asociados a la producción, la tarifa asociada al tratamiento del envase por EcoCampo y los costos de acondicionamiento de los envases recuperados. En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, se consideran las emisiones de CO₂ asociadas a producir un envase nuevo de cada producto, las emisiones de CO₂ de traslado de envases del proveedor a la planta, y la cantidad de envases nuevos que consumen plástico.

CONJUNTOS

NA: Productos pertenecientes a la línea de nutrición animal.

NV: Productos pertenecientes a la línea de nutrición vegetal.

P: Unión de productos de nutrición animal y vegetal, con subíndice *p*.

T: Períodos (días) de planificación con subíndice *t*. Toma valores entre 1 y $J=|T|$.

T' : $\{0\} \cup T$.

PARÁMETROS

J: Horizonte de planificación.

D_p : Pronóstico de demanda del producto p considerado para la planificación de la producción.

c_p : Costo de producción por unidad del producto p , considerando costo de materia prima y operación.

c_p^n : Costo por unidad del envase nuevo del producto p , incluyendo la tarifa asociada al tratamiento del envase por EcoCampo.

c^r : Costo de recuperación de un envase

k_p : Costo fijo de preparación de la producción del producto p .

h_p^e : Emisiones de CO₂ asociadas a producir un nuevo envase del producto p .

h^{prov} : Emisiones de CO₂ asociadas a una visita del proveedor de envases.

I_p : Stock inicial del producto p en el período $t=0$.

B_p^M : Conversión de unidades a masa del producto p .

B_p^V : Conversión de unidades a volumen del producto p .

Q_t^{na} : Capacidad de producción en toneladas de la línea de nutrición animal en el período t .

Q_t^{nv} : Capacidad de producción en litros de la línea de nutrición vegetal en el período t .

Q^{prov} : Capacidad volumétrica del camión proveedor de envases.

B_p^{VE} : Conversión de unidades a volumen del envase de producto p .

B_p^{ME} : Conversión de unidades a masa del envase de producto p .

B : Número de activación de la variable binaria δ_{pt} , el cual se determina a partir de la capacidad máxima de producción.

S_p : Stock inicial del envase recuperado del producto p .

VARIABLES DE DECISIÓN

x_{pt} : Cantidad de unidades a producir del producto p con envases nuevos en el período t .

r_{pt} : Cantidad de unidades a producir del producto p con envases recuperados en el período t .

y_{pt} : Cantidad de unidades a almacenar del producto p en el período t .

s_{pt} : Cantidad de unidades a almacenar del envase recuperado del producto p en el período t .

$\delta_{pt} \in \{0, 1\}$: Vale 1 cuando se produce un producto p en el período t , 0 de lo contrario.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Rentabilidad:

$$\min \sum_{p,t} (c_p(x_{pt} + r_{pt}) + c_p^n x_{pt} + k_p \delta_{pt} + c^r r_{pt}) \quad (33)$$

Ambiental en términos de CO₂:

$$\min \sum_{p,t} (h_p^e B_p^{ME} x_{pt} + (h^{prov} B_p^{VE} x_{pt}) / Q^p) \quad (34)$$

Ambiental en términos de cantidad de plástico:

$$\min \sum_{p,t} x_{pt} \quad (35)$$

Sujeto a:

$$y_{pt} = y_{p,t-1} + x_{pt} + r_{pt}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (36)$$

$$y_{p0} = I_p, \quad \forall p \in P \quad (37)$$

$$s_{pt} = s_{p,t-1} - r_{pt}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (38)$$

$$s_{p0} = S_p, \quad \forall p \in P \quad (39)$$

$$\sum_{p \in NA} B_p^M (x_{pt} + r_{pt}) \leq Q_t^{na}, \quad \forall t \in T \quad (40)$$

$$\sum_{p \in NV} B_p^V (x_{pt} + r_{pt}) \leq Q_t^{nv}, \quad \forall t \in T \quad (41)$$

$$\sum_t (x_{pt} + r_{pt}) \geq D_p, \quad \forall p \in P \quad (42)$$

$$x_{pt} + r_{pt} \leq B \delta_{pt}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (43)$$

$$s_{p,t-1} \geq r_{pt}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (44)$$

$$\delta_{pt} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (45)$$

$$x_{pt}, y_{pt}, r_{pt}, s_{p,t} \geq 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (46)$$

La función objetivo (33) se define como la minimización de costos asociados a la producción y preparación de producir cierto producto, diferenciando entre envases nuevos y recuperados. A su vez, se cuantifica un ahorro en los costos de reciclaje de EcoCampo. La función objetivo (34) hace referencia a la minimización de los impactos ambientales medidos en toneladas de CO₂ asociados a la compra y producción de envases. La función objetivo (35) hace referencia a la minimización del uso de plástico. Las restricciones (36) hacen referencia al inventario a almacenar luego de producir cada producto en cada período, mientras que las restricciones (37) inicializan el inventario de los distintos productos. Del mismo modo, las restricciones (38) refieren al inventario de envases recuperados a almacenar luego de producir productos utilizando envases reutilizados en cada período, mientras que las restricciones (39) inicializan el inventario de los distintos productos. Las restricciones (40) y (41) representan las limitaciones de la capacidad de producción según cada línea, en toneladas y litros respectivamente. Las restricciones (42) garantizan que la cantidad producida total sea al menos la demanda pronosticada. Las restricciones (43) corresponden a la activación de las variables binarias asociadas a la producción. Las restricciones (44) limitan la utilización de envases recuperados conforme a su stock. Por último, las restricciones (45) y (46) determinan los dominios de las variables.

6.3. Problema de Distribución de la producción

En este modelo, se busca determinar la distribución de la producción, definiendo entregas a los clientes en un horizonte semanal con definiciones diarias, así como también la recuperación de envases disponibles para retirar en los clientes. De esta forma, se decide la cantidad de mercadería a entregar a cada cliente, y de envases a recuperar de ellos, el período y el medio de transporte para llevarlo a cabo, de forma de maximizar la ganancia y minimizar las emisiones de CO₂. En líneas generales, las definiciones del modelo son iguales a las mencionadas en el problema de distribución de la producción de la Sección 5.2, por lo que se consideran las mismas hipótesis y restricciones. A continuación, se detallan las principales características específicas para el modelo de distribución de la producción con opciones de retorno.

Conjuntos de camiones para viajes de ida y de vuelta: Se consideran cinco conjuntos de camiones: el conjunto camión propio, dos conjuntos pertenecientes a camiones tercerizados, y otros dos de agencia. Cada tipo de transporte cuenta con dos conjuntos: uno de ida para distribuir la producción, y otro de vuelta para recuperar envases.

Capacidad de cumplir pedidos y recolectar envases en un mismo viaje: El camión propio está habilitado a entregar productos y recuperar envases de un mismo cliente, en un mismo viaje.

Stock de envases disponibles a recolectar en cada cliente: Como se mencionó en la Sección 6, el stock de envases disponibles a recolectar en cada cliente será un dato proveniente de las ventas abastecidas en períodos anteriores. A su vez, el stock de envases a recuperar en cada nodo es un único dato por semana, y no es actualizado diariamente. Se toma la hipótesis de que este parámetro no puede aumentar en determinado horizonte de planificación.

Cantidad mínima de envases a recuperar en cada cliente: Se considera un porcentaje del stock de envases de cada cliente como una cantidad mínima de envases que se deben recolectar.

6.3.1. Formulación del Modelo Matemático

OBJETIVO

El objetivo consiste en determinar la cantidad de cada producto que se entregará en la visita a cada cliente y con qué medio de transporte, en cada período de tiempo durante un horizonte de planificación. A su vez, se debe determinar qué envases se recolectarán y con qué medio de transporte, buscando minimizar el impacto ambiental y maximizar la rentabilidad de la empresa. Se consideran los costos fijos y variables de visitar a un cliente con cada medio de transporte en caso de que corresponda y, por política de la empresa, un costo asociado a la entrega tardía de los pedidos de los clientes. En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, se considera las emisiones de CO₂ asociadas al traslado de los camiones que entregan mercadería a los clientes.

CONJUNTOS

P : Productos con subíndice p .

E : Envases de productos con subíndice e .

T : Períodos (días) de planificación con subíndice t . Toma valores entre 1 y $J=|T|$.

T' : $\{0\} \cup T$.

VP : Camiones propios.

VT^{ID} : Camiones tercerizados de ida.

VT^{VTA} : Camiones tercerizados de vuelta.

VA^{ID} : Camiones de agencia de ida.

VA^{VTA} : Camiones de agencia de vuelta.

V^{ID} : Representa la unión de los conjuntos de camiones de ida, que incluye camiones tercerizados de ida, de agencia de ida y propios.

V^{VTA} : Representa la unión de los conjuntos de camiones de vuelta, que incluye camiones tercerizados de vuelta, de agencia de vuelta y propios.

N : Clientes de la empresa.

PARÁMETROS

J : Horizonte de planificación.

d_{npt} : Demanda del cliente n , del producto p en el período t .

$h\nu_n$: Emisiones de CO₂ de visitar al cliente n .

c_n^{vp} : Costo fijo de visitar al cliente n con el camión propio.

$c^{va,f}$: Costo fijo de utilizar un camión de agencia.

$c^{va,v}$: Costo por tonelada de utilizar un camión de agencia.

c_n^{vt} : Costo por tonelada de enviar un producto al cliente n con un camión tercerizado.

cf_p : Costo por unidad de producto p de generar retrasos en las entregas.

I_p : Stock inicial del producto p en el período $t=0$.

L : Cantidad máxima de visitas del camión propio por período.

$Q^{vp,v}$: Capacidad volumétrica del camión propio.

$Q^{vp,m}$: Capacidad másica del camión propio.

$Q^{va,v}$: Capacidad volumétrica del camión de agencia.

$Q^{va,m}$: Capacidad másica del camión de agencia.

$Q^{vt,v}$: Capacidad volumétrica del camión tercerizado.

$Q^{vt,m}$: Capacidad másica del camión tercerizado.

M : Número de activación de la variable binaria z_{nvt} . $M=2Max(Q^{vt,v} \cup Q^{va,v} \cup Q^{vp,v})$.

B_e^V : Conversión de unidades a m^3 del envase e .

B_e^M : Conversión de unidades a toneladas del envase e .

B_p^V : Conversión de unidades a m^3 del producto p .

B_p^M : Conversión de unidades a toneladas del producto p .

S_{ne} : Stock de envases disponibles para recolectar en el cliente n del tipo e .

N^{max} : Cota superior (máximo) del conjunto de clientes que no puede visitar el camión propio.

N^{min} : Cota inferior (mínimo) del conjunto de clientes que no puede visitar el camión propio.

a : Porcentaje de envases a recuperar de los clientes.

VARIABLES DE DECISIÓN

y_{pt} : Cantidad de unidades a almacenar del producto p en el período t .

$z_{nvt} \in \{0, 1\}$: Vale 1 en caso de visitar al cliente n , con el camión v en el período t ;

y es 0 de lo contrario.

w_{pnt} : Cantidad a entregar del producto p , al cliente n con el camión $v \in \{V^{ID} \cup V^{VTA}\}$ en el período t .

r_{nevt} : Cantidad a recuperar del envase e , del cliente n , con el camión $v \in \{V^{ID} \cup V^{VTA}\}$ en el período t .

b_{pnt}^1 : Cantidad de producto p entregados por adelantado al cliente n en el período t .

b_{pnt}^2 : Cantidad de producto p con retraso de entrega al cliente n en el período t .

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Rentabilidad:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{n, vp, t} (c_n^{vp} z_{nvt}) + \sum_{n, va^{ID}, t} (c^{va, f} z_{nvt}) + \sum_{n, p, va^{ID}, t} (c^{va, v} B_p^M w_{pnt}) + \\ & \sum_{n, p, vt^{ID}, t} (c_n^{vt} B_p^M w_{pnt}) + \sum_{n, p, t} (c_f p b_{npt}^2) \\ & \sum_{n, e, va^{VTA}, t} (c^{va, v} B_e^M r_{nevt}) + \sum_{n, e, vt^{VTA}, t} (c_n^{vt} B_e^M r_{nevt}) \end{aligned} \quad (47)$$

Ambiental:

$$\min \quad \sum_{n, v, t} (h v_n z_{nvt}) \quad (48)$$

Sujeto a:

$$y_{pt} = y_{p,t-1} - \sum_{n,v^{ID}} (w_{pnvt}), \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (49)$$

$$y_{p0} = I_p, \quad \forall p \in P \quad (50)$$

$$\sum_{t,v^{VTA}} r_{nevt} \leq S_{ne}, \quad \forall n \in N, \quad \forall e \in E, \quad \forall t \in T \quad (51)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) + \sum_e (B_e^V r_{nevt}) \leq Mz_{nvt}, \quad \forall t \in T, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in \{V^{ID} \cup V^{VTA}\} \quad (52)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) \leq Q^{vp,v}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (53)$$

$$\sum_p (B_p^M w_{pnvt}) \leq Q^{vp,m}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (54)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) \leq Q^{va,v}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VA^{ID}, \quad \forall t \in T \quad (55)$$

$$\sum_p (B_p^M w_{pnvt}) \leq Q^{va,m}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VA^{ID}, \quad \forall t \in T \quad (56)$$

$$\sum_p (B_p^V w_{pnvt}) \leq Q^{vt,v}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VT^{ID}, \quad \forall t \in T \quad (57)$$

$$\sum_p (B_p^M w_{pnvt}) \leq Q^{vt,m}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VT^{ID}, \quad \forall t \in T \quad (58)$$

$$\sum_e (B_e^V r_{nevt}) \leq Q^{vp,v}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (59)$$

$$\sum_e (B_e^V r_{nevt}) \leq Q^{va,v}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VA^{VTA}, \quad \forall t \in T \quad (60)$$

$$\sum_e (B_e^V r_{nevt}) \leq Q^{vt,v}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in VT^{VTA}, \quad \forall t \in T \quad (61)$$

$$d_{npt} - \sum_{v^{ID}} w_{pnvt} + b_{pnt}^1 - b_{pn,t-1}^1 + b_{pn,t-1}^2 - b_{pnt}^2 = 0, \quad \forall n \in N, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (62)$$

$$\sum_{v \in ID_t} (w_{pnt}) = \sum_t (d_{npt}), \quad \forall p \in P, \quad \forall n \in N \quad (63)$$

$$(z_{nvt}) \leq \sum_p (w_{pnt} + r_{nevt}), \quad \forall v \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T \quad (64)$$

$$\sum_n (z_{nvt}) \leq 1, \quad \forall v \in \{VA^{ID} \cup VA^{VTA} \cup VT^{ID} \cup VT^{VTA}\}, \quad \forall t \in T \quad (65)$$

$$\sum_n (z_{nvt}) \leq L, \quad \forall v \in VP, \quad \forall t \in T \quad (66)$$

$$z_{nvt} = 0, \quad \forall t \in T, \quad \forall n \in [N^{min}, N^{max}], \quad \forall v \in VP \quad (67)$$

$$\sum_{n \in ID} (w_{pnt}) \leq y_{p,t-1}, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T \quad (68)$$

$$\sum_{n \in VTA_t} (r_{nevt}) \geq a \sum_n s_{ne}, \quad \forall e \in E \quad (69)$$

$$w_{pnt} = 0, \quad \forall v \in V^{VTA} \setminus VP \quad (70)$$

$$r_{nevt} = 0, \quad \forall v \in V^{ID} \setminus VP \quad (71)$$

$$w_{pnt}, r_{nevt}, y_{pt}, b_{pnt}^1, b_{pnt}^2 \geq 0, \quad \forall n \in N, \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T, \quad \forall v \in \{V^{ID} \cup V^{VTA}\} \quad (72)$$

$$z_{nvt} \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, \quad \forall v \in V, \quad \forall t \in T \quad (73)$$

Como se muestra en (47) y (48), los objetivos se definen como la minimización de costos y la minimización de impacto ambiental de la empresa. Dichos costos dependen de la ubicación de los clientes a visitar, y la cantidad de producto u envase entregado/recuperado. A su vez, la minimización ambiental se constituye por el ahorro de emisiones de CO₂ asociado a los viajes de camiones. Las restricciones (49) y (50) se refieren al balance de inventario e inicialización del mismo. Las restricciones (51) limitan la cantidad de retornos según el stock en cada cliente. En las restricciones (52) se plasman la activación de las variables binarias de viajes, mientras que desde las restricciones (53) hasta las (61), se acotan las capacidades volumétricas y máxicas de los viajes. Las restricciones (62) determinan las entregas atrasadas y adelantadas en cada período. Las restricciones (63) obligan a llevar a cada cliente la cantidad de cada producto que fue pedida. Las restricciones (64) impiden que la variable binaria z_{nvt} tome valores positivos cuando no se lleven productos o se recolecten envases a los clientes. Las restricciones (65) y (66) acotan las visitas diarias de cada camión a cierto cliente. Las restricciones (67) impiden que el camión propio visite a los clientes más alejados. Las restricciones (68) limitan la cantidad a entregar de cada día según el stock final del día anterior. Las restricciones (69) obligan a recuperar un porcentaje del stock inicial de envases. Las restricciones (70) y (71) describen los tipos de viajes habilitados para cada camión. Por último las restricciones (72) y (73) determinan los dominios de las variables.

6.4. Validación de modelos

Una vez finalizada la construcción del modelo se procede a la validación del mismo, con el objetivo de verificar que el modelo represente la realidad deseada.

6.4.1. Planificación de la producción

Para realizar la validación de este modelo, se consideran conjuntos reducidos de datos. Se considera un máximo de tres períodos, y tres productos distintos: dos pertenecientes a la línea de producción animal, y un producto de la línea de producción vegetal.

Dado que el modelo de planificación de la producción sin opciones de retorno es muy similar al modelo de planificación de la producción con opciones de retorno, algunas validaciones a realizar son muy similares a las vistas en la Sección 5.3.1. Sin embargo, también se consideraron otros casos en donde se valida el comportamiento de la planificación de la producción a partir del retorno de envases. Se valida:

- Producción nula en caso de que no exista demanda.
- Restricciones de capacidad de producción frente a un exceso de demanda.
- Definición de las líneas de producción y la relación de productos pertenecientes a cada una.
- Restricciones de producción frente a diversos escenarios de demanda.
- Correcto comportamiento de la planificación de la producción variando costos y stock de envases nuevos y recuperados.

Estas pruebas de validación se encuentran en la Sección de Anexos 11, donde se documentan algunos casos con el objetivo de ejemplificar la validación realizada. Otras pruebas del modelo fueron realizadas durante la etapa de construcción del mismo.

En esta Sección se detalla, a modo de ejemplo, una validación relevante, en donde se evalúa el correcto comportamiento de la función objetivo de costos, planificando la producción según el stock de envases recuperados y envases nuevos.

Caso 1: Comportamiento de la planificación de la producción según costos y stock de envases nuevos y recuperados

Esta validación se realizó con el objetivo de analizar la ejecución de la planificación de la producción y el comportamiento de la función objetivo de minimizar costos, según los costos de envases nuevos y recuperados, y el stock de cada uno. Para ello, se consideró un costo de reutilizar un envase menor al costo de usar un envase nuevo. A su vez, se consideró un stock de envases recuperados menor a la cantidad necesaria para satisfacer completamente la demanda. Debido a esto, se esperaba que los resultados del modelo utilicen todo el stock de envases recuperados, y que utilicen la cantidad de envases nuevos necesaria para completar la producción y satisfacer la demanda.

Para realizar esta validación, se consideraron los siguientes valores para los parámetros.

Valores de parámetros

Producto	Demanda
1	60
2	34
3	25

Tabla 28: Demanda pronosticada - Planificación de la producción: Caso 1.

Costo de utilizar un envase recuperado asociado a su reacondicionamiento	10.
--	-----

Tabla 29: Costo de reacondicionar envase recuperado - Planificación de la producción: Caso 1.

Producto	Costo del envase nuevo
1	60
2	36
3	25

Tabla 30: Costo del envase nuevo por producto - Planificación de la producción: Caso 1.

Producto	Stock inicial
1	50
2	30
3	20

Tabla 31: Stock inicial de envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.

Los resultados obtenidos para la planificación son los siguientes:

Período	Cantidad a producir
1	10
2	40
3	0

Tabla 32: Cantidad producida del producto 1 con envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	0
2	0
3	30

Tabla 33: Cantidad producida del producto 2 con envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	0
2	20
3	0

Tabla 34: Cantidad producida del producto 3 con envases recuperados - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	0
2	10
3	0

Tabla 35: Cantidad de unidades a producir del producto 1 con envases nuevos - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	0
2	0
3	4

Tabla 36: Cantidad de unidades a producir del producto 2 con envases nuevos - Planificación de la producción: Caso 1.

Período	Cantidad a producir
1	0
2	5
3	0

Tabla 37: Cantidad de unidades a producir del producto 3 con envases nuevos- Planificación de la producción: Caso 1.

Como se puede observar desde la Tabla 32 hasta la Tabla 37, los resultados obtenidos fueron acorde a lo esperado. Es decir, dado que el costo de utilizar un envase recuperado es menor al costo de un envase nuevo, se maximiza la cantidad producida con envases recuperados y se completa la producción necesaria para satisfacer la demanda utilizando envases nuevos.

6.4.2. Distribución de la producción

Para realizar la validación de este modelo, se consideran conjuntos reducidos de datos. Se considera un máximo de tres períodos, tres productos distintos y sus tres envases correspondientes. A su vez, se consideran cinco camiones entre agencia y tercerizados, los cuales pueden realizar viajes de entrega de mercadería desde la planta a los clientes; y cinco camiones entre agencia y tercerizados capaces de recuperar envases desde la ubicación de los clientes y trasladarlos hasta la planta. Por otro lado, se cuenta con un único camión propio, el cual puede realizar viajes de ida a los clientes pero también viajes de recuperación de envases. Se consideran cinco clientes distintos.

Dado que el modelo de distribución de la producción con opciones de retorno es muy similar al modelo de distribución de la producción sin opciones de retorno, algunas validaciones a realizar son muy similares a las vistas en la Sección 5.3.2. Sin embargo, también se consideran otros casos en donde se valida el comportamiento del modelo asociado a los tipos de viajes realizados por cada camión y la recuperación de envases de los distintos clientes.

Los casos a probar se determinan con el objetivo de que las distintas funcionalidades del modelo sean validadas. Para esto, se procede a validar:

- Restricciones de entrega de producto frente a una demanda mayor al stock.
- Recuperación nula de envases en caso de que no exista stock de estos en los clientes.
- Restricciones de capacidad de traslado de mercadería, tanto para la entrega de productos como para la recuperación de envases.
- Cantidad de viajes de entrega nulos en caso de que no exista demanda.
- Correcto comportamiento de los viajes de cada camión para entregar mercadería.
- Correcto comportamiento de los viajes de cada camión para recuperar envases.
- Restricción que permite que el camión propio pueda realizar viajes de entrega de mercadería, así como también viajes de recuperación de envases.
- Correcto funcionamiento de la selección de camiones según la variación de los costos de cada uno, así como también la consideración del costo de backlog asociado al retraso del cumplimiento de los pedidos del cliente para determinada fecha.

Estas pruebas de validación se encuentran en la Sección de Anexos 11, donde se documentan algunos casos con el objetivo de ejemplificar la validación realizada. Otras pruebas del modelo fueron realizadas durante la etapa de construcción del mismo.

En esta Sección se detallan ciertas validaciones relevantes en donde se evalúa el correcto comportamiento de viajes de los camiones.

Caso 1: Restricción que limita el máximo de viajes que puede realizar el camión propio en el mismo día

En esta validación se analizó la correcta ejecución de las restricciones que limitan la cantidad de viajes que puede realizar el camión propio de la empresa. Es decir, se busca probar que el camión propio visite a más de un cliente por día. Para ello, se determina la demanda de un cliente igual a la capacidad máxima del camión, y otro cliente también con demanda positiva. A su vez, se determina que la cantidad máxima de viajes que el camión puede realizar por día sea dos y la capacidad de los otros camiones como nula.

Para realizar esta validación, se consideraron los siguientes valores para los parámetros:

Valores de parámetros

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	0	0	0
2	50	0	0
3	0	30	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 38: Demanda de cada cliente en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 1.

Capacidad volumétrica del camión propio	50
---	----

Tabla 39: Capacidad volumétrica del camión propio - Distribución de la producción: Caso 1.

Cantidad de viajes que puede hacer el camión propio por período	2
---	---

Tabla 40: Cantidad máxima de viajes del camión propio - Distribución de la producción: Caso 1.

Las soluciones obtenidas se plasman a continuación.

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	0	0	0
2	50	0	0
3	0	30	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 41: Cantidad entregada por el camión propio en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 1.

Variable	Valor
$Z_{2,propio,1}$	1
$Z_{3,propio,1}$	1

Tabla 42: Variable de viajes realizados - Distribución de la producción: Caso 1.

Tal como se esperaba y como es posible observar en las Tablas de resultados 41 y 42, el camión propio realizó dos viajes distintos en el mismo período para los clientes dos y tres, satisfaciendo completamente las demandas.

Caso 2: Restricciones de viajes de entrega de mercadería y viajes de recuperación de envases para el camión propio

En los datos de este modelo, se consideraron distintos camiones de agencia y tercerizados que puedan realizar viajes de entrega de mercadería o viajes de recuperación de envases. El único camión capaz de poder entregar mercadería y recuperar envases en el mismo viaje es el camión propio de la empresa. Por esta razón, esta validación se realizó con el objetivo de validar las restricciones de viajes del camión propio asociadas a la entrega de mercadería y de recuperación de envases. Es decir, se buscaba validar que este camión entregue mercadería y recupere envases de determinado cliente en un mismo viaje. A su vez, con el objetivo de validar la restricción de capacidad del camión, se determinó que la demanda de mercadería a entregar al cliente sea igual a la capacidad máxima del vehículo.

Para realizar esta validación, se consideraron los siguientes parámetros:

Valores de parámetros

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	0	0	0
2	50	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 43: Demanda de cada cliente en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.

Capacidad volumétrica del camión propio ($Q^{vp,v}$)	50
--	----

Tabla 44: Capacidad volumétrica del camión propio - Distribución de la producción: Caso 2.

Cliente	Envase 1	Envase 2	Envase 3
1	0	0	0
2	50	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 45: Stock inicial de envases disponibles a recuperar - Distribución de la producción: Caso 2.

Porcentaje mínimo de recuperación de envases	4 %
--	-----

Tabla 46: Porcentaje mínimo de recuperación - Distribución de la producción: Caso 2.

Las soluciones obtenidas se plasman a continuación.

Cliente	Producto 1	Producto 2	Producto 3
1	0	0	0
2	50	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 47: Cantidad entregada por el camión propio en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.

Cliente	Envase 1	Envase 2	Envase 3
1	0	0	0
2	2	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 48: Envases recuperados por el camión propio en el período 1 - Distribución de la producción: Caso 2.

Variable	Valor
$z_{2,propio,1}$	1

Tabla 49: Variable de los viajes realizado - Distribución de la producción: Caso 2.

Tal como se esperaba y como es posible observar desde la Tabla de resultados 47 hasta la Tabla 49, el camión propio realizó un único viaje en donde a la ida satisfizo la demanda con mercadería al cliente y a la vuelta trasladó envases recolectados a la planta.

6.5. Formulación de los modelos con Programación por Metas

Los modelos con opción de recuperación plantean más objetivos que en los modelos de la situación actual, sin opciones de retornos. Estos buscan minimizar costos, pero también minimizar el impacto ambiental, dado por las emisiones de CO₂ a la atmósfera y la generación de plástico. Por lo tanto, se

obtienen modelos multiobjetivo. Este tipo de modelo tiene varios métodos de resolución. Uno de ellos es Programación por Metas. Como se vió en la Sección 2.2, este método consiste en convertir un modelo multiobjetivo en monobjetivo. Se agregan variables de desviación a los objetivos, convirtiéndolos en restricciones que aspiran a ciertas metas. El objetivo del problema pasa a ser la minimización de las variables de desviación no deseadas.

A continuación se procede a realizar esta conversión en los modelos de producción y distribución de la producción.

6.5.1. Planificación de la producción con recuperación de envases

Para transformar el modelo multiobjetivo de planificación de la producción con recuperación de envases al formato de Programación por metas, se realizan cambios en las variables, parámetros, funciones objetivo y restricciones.

A continuación se presentan los cambios realizados. Las partes del modelo que no son mencionadas no sufren cambios.

- **Parámetros:** Se agregan parámetros correspondientes a las metas asociadas a cada objetivo.

MCosto: Meta a alcanzar asociados a los costos de producción.

MAmb: Meta a alcanzar asociados al impacto ambiental de la producción.

MPL: Meta a alcanzar asociados a la producción de plástico.

- **Variables de decisión:** Se agregan variables de desviación positivas y negativas correspondientes a cada objetivo.

n^c : Desviación negativa de los costos productivos.

p^c : Desviación positiva de los costos productivos.

n^a : Desviación negativa de las emisiones de CO₂ productivas.

p^a : Desviación positiva de las emisiones de CO₂ productivas.

n^p : Desviación negativa de la cantidad de plástico.

p^l : Desviación positiva de la cantidad de plástico.

- **Función objetivo:**

Se suplantán los tres objetivos planteados en la Sección 6.2 por un único objetivo que busca minimizar las variables de desviación no deseadas. Cuando se quiere minimizar un atributo, las variables de desviación no deseadas son las positivas.

A su vez, dichas variables son normalizadas para evitar que la magnitud de los objetivos pese en la decisión. Dicha normalización se realiza dividiendo cada variable por su meta correspondiente.

De esta manera, se obtiene un problema de programación por metas de metas ponderadas, con ponderación 1, cuya función objetivo es la siguiente:

$$\min (p^c/MCosto + p^a/MAmb + p^l/MPL) \quad (74)$$

- **Restricciones:** las funciones objetivo del problema multicriterio se convierten en restricciones, donde se relacionan los objetivos, las variables de desviación, y las metas.

$$\sum_{p,t} (c_p(x_{pt} + r_{pt}) + c_p^n x_{pt} + k_p \delta_{pt} + c^r r_{pt}) + n^c - p^c = MCosto \quad (75)$$

$$\sum_{p,t} (h_p^e B_p^{ME} x_{pt} + (h_p^{prov} B_p^{VE} x_{pt})/Q^p) + n^a - p^a = MAmb \quad (76)$$

$$\sum_{p,t} x_{pt} + n^p - p^l = MPI \quad (77)$$

6.5.2. Distribución de la producción con recuperación de envases

Al igual que en el modelo de planificación de la producción, se realizaron cambios en el modelo de distribución para transformarlo al formato de Programación por metas. Se realizan cambios en las variables, parámetros, funciones objetivo y restricciones.

A continuación se presentan los cambios realizados. Las partes del modelo que no son mencionadas no sufren cambios.

- **Parámetros:** Se agregan parámetros correspondientes a las metas asociadas a cada objetivo.

MCosto: Meta a alcanzar asociados a los costos de distribución.

MAmb: Meta a alcanzar asociados al impacto ambiental de distribución.

- **Variables de decisión:** Se agregan variables de desviación positivas y negativas correspondientes a cada objetivo.

n^c : Desviación negativa de los costos logísticos.

p^c : Desviación positiva de los costos logísticos.

n^a : Desviación negativa de las emisiones de CO₂.

p^a : Desviación positiva de las emisiones de CO₂.

- **Función objetivo:**

Se suplantán los dos objetivos planteados en la Sección 6.3 por un único objetivo que busca minimizar las variables de desviación no deseadas. Nuevamente, se quiere minimizar atributos, por lo que las variables de desviación no deseadas son las positivas.

Dichas variables también se normalizan, siendo divididas por sus metas correspondientes, obteniendo un problema de programación por metas de metas ponderadas, con ponderación 1. Su función objetivo es la siguiente:

$$\min (p^c/MCosto + p^a/MAmb) \quad (78)$$

- **Restricciones:** las funciones objetivo del problema multicriterio se convierten en restricciones, donde se relacionan los objetivos, las variables de desviación, y las metas.

$$\sum_{n,vp,t} (c_n^{vp} z_{nvt}) + \sum_{n,va^{ID},t} (c^{va,f} z_{nvt}) + \sum_{n,p,va^{ID},t} (c^{va,v} B_p^M w_{pnvt}) + \sum_{n,p,vt^{ID},t} (c_n^{vt} B_p^M w_{pnvt}) + \quad (79)$$

$$\sum_{n,p,t} (c f_p b_{npt}^2) + \sum_{n,e,va^{VTA},t} (c^{va,v} B_e^M r_{nevt}) + \sum_{n,e,vt^{VTA},t} (c_n^{vt} B_e^M r_{nevt}) + n^c - p^c = MCosto$$

$$\sum_{n,v,t} (h v_n z_{nvt}) + n^a - p^a = MAmb \quad (80)$$

7. Relevamiento y análisis de datos

Para poder resolver los modelos planteados anteriormente, es necesario conocer los valores de los conjuntos y parámetros de entrada. Estos datos fueron en parte proporcionados por la empresa, y en parte estimados para el proyecto.

Todos los parámetros de costos fueron convertidos a dólares. Se tomó la media de la cotización del Banco República Oriental del Uruguay (BROU) del día 12 de abril de 2022, a 41,55 pesos uruguayos el dólar. A su vez, todos los valores de masa se calcularon en toneladas, y los valores volumétricos en litros.

A continuación se describe cómo se realizó la obtención de los datos.

7.1. Datos proporcionados por la empresa

Todos los modelos fueron ejecutados con un horizonte temporal de cinco días, simulando la producción y distribución de productos de lunes a viernes, días en los que la empresa trabaja actualmente.

A su vez, la empresa aportó los siguientes datos que son incluidos como parámetros en los modelos sin ninguna estimación ni conversión:

- Conjuntos de productos.
- Capacidad de producción másica de nutrición animal.
- Capacidad de producción volumétrica de nutrición vegetal.
- Conversión de unidades a masa de los productos .
- Conversión de unidades a volumen de los productos.
- Costo fijo de utilizar un camión de agencia.
- Costo variable según el peso de utilizar un camión de agencia.
- Capacidades volumétricas y másicas de cada tipo de camión, incluido el camión utilizado por el proveedor actual de envases nuevos
- Conversiones de unidades a volumen y masa de los distintos envases

Los productos en los modelos de planificación de la producción se incorporaron como dos conjuntos por separado. Luego, se forma un nuevo conjunto de productos como la unión de los conjuntos previamente establecidos. Por otro lado, los modelos de distribución son alimentados por un único conjunto de productos. Se puede ver el detalle en la tabla a continuación:

Conjunto	Elementos
Productos de Nutrición animal	na ₁ - na ₈
Productos de Nutrición vegetal	nv ₁ - nv ₂₂

Tabla 50: Conjuntos de productos.

7.2. Datos estimados

Dada la naturaleza del proyecto y la necesidad de datos muy concretos, muchos parámetros debieron ser estimados. Esto se realizó con información obtenida de la empresa e hipótesis tomadas por el equipo de proyecto.

7.2.1. Datos para la Planificación de la producción

El parámetro de **demanda** en los modelos de planificación de la producción (D_p) fue estimado a partir de datos de la empresa. Como se mencionó en la Sección 4.1, la empresa trabaja para mantener un stock de tres meses en inventario. Por lo tanto, las órdenes de producción están atadas a una demanda pronosticada que puede ser considerada uniforme, desacoplada de los pedidos de los clientes que se hacen contra el inventario.

La empresa proporcionó los datos de pedidos de clientes de un mes en particular del 2021. Dicho mes no pertenece a un período de pico de demanda de sus productos, por lo que es un mes estándar. Se calculó cuántos productos en total se vendieron en el mes entero, y se multiplicó por tres para simular una demanda de tres meses. Luego, se dividió dicho valor entre doce, para llegar a una demanda uniforme semanal, suponiendo que cada mes cuenta con cuatro semanas. Este valor de demanda fue fijado por igual en todos los modelos de planificación de la producción.

Los modelos de planificación de la producción tienen tres parámetros de costos asociados a los productos. Por un lado, se encuentra el **costo de producción** (c_p). Este es calculado a partir de costos operativos y costo de materia prima distinta al envase. La empresa proporcionó los costos operativos para cada línea de producción, pero no los costos de materia prima de los productos de nutrición vegetal. Sin embargo, se contaba con el precio de venta de los mismos, que sí fue proporcionado. Con este dato, y asumiendo que el porcentaje de ganancia de los productos vegetales es igual al de los animales, se estimó el costo de materia prima vegetal, completando así los costos de producción para todos los productos.

Otro costo que se tiene en cuenta en los modelos de planificación de producción es el **costo de envase** (c_p^n). El costo de envase está compuesto por el costo del material plástico, y el costo asociado a la disposición por parte de EcoCampo. La empresa proporcionó los costos de los plásticos y el pago efectuado a EcoCampo en el mismo mes del cual proporcionó los datos de demanda. Por lo tanto, partiendo de la hipótesis de que la calidad y cantidad de plástico de cada envase se toma por igual por EcoCampo, se dividió el pago entre la cantidad de unidades vendidas. De esta forma, se obtiene el costo por unidad y se determina el parámetro referido al costo de envase en el modelo.

El último costo a tener en cuenta en la producción es el **costo de preparación** de cada producto (k_p). La empresa no cuenta con estos costos en particular, pero sí tiene especificaciones para los cambios de productos en las líneas. La operación que se tiene en cuenta para cambiar de producto es la limpieza de la línea. Por lo tanto, se tomaron estos requisitos y se estimó un costo de preparación.

Los productos de nutrición vegetal solo cuentan con un proceso de fraccionado a partir de tarrinas, por lo que no hay un impacto sustancial en el cambio de productos a envasar. De esta manera, se asume que tienen costo de preparación nulo.

En la línea de nutrición animal se realiza un proceso más elaborado y con varias etapas. Sin embargo, solo se debe realizar limpieza de la línea al pasar a un tipo de producto en particular denominado “*mix*”. Solo dos productos de los ocho de la línea animal son de este tipo. Por lo tanto, solo se les asignó un costo de preparación a estos productos.

El valor de este costo se calculó como el ingreso que pierde la empresa por no producir durante el tiempo de limpieza. Para ello, se calculó un tiempo de limpieza de la línea. La limpieza puede ser en húmedo o seco, con una demora de cuatro y ocho horas respectivamente. Por lo tanto, con un tiempo promedio de limpieza de la línea de seis horas y la capacidad productiva de la línea, se estimó cuantas unidades dejan de producirse en el tiempo de limpieza. Se multiplicó esta cantidad por el precio promedio de los productos de la línea, llegando así a un costo de preparación que equivale a las unidades que se pierden de producir al cambiar de producto.

Otro parámetro a estimar fue el **número de activación** de las variables binarias de producción (B). Dicho parámetro no solo activa la producción, sino que la restringe, aunque este no sea su objetivo. Por lo tanto, se debió calcular el valor de B como un número de magnitud adecuada. Por dicha razón, se lo calculó como la máxima cantidad de producto que se puede hacer por día, tomando en consideración la línea con mayor capacidad de unidades diarias, es decir, la línea vegetal.

El **stock inicial de productos** se debió estimar únicamente para el primer horizonte de planificación, ya que el stock inicial de los siguientes horizontes de planificación se infieren de la resolución sucesiva de los modelos, lo cual se detalla más adelante.

Dado que la empresa produce para mantener un stock de productos equivalente a las ventas de tres meses, se estipuló que el stock inicial en el primer período del primer horizonte de planificación es este mismo valor. Es decir, las ventas proporcionadas por la empresa multiplicadas por tres. De esta manera, se simula que la planta se encuentra en un estado estacionario, con productos en inventario.

Para diseñar el escenario de producción con opciones de retorno se debieron estimar varios parámetros. Uno de ellos es el **costo de reacondicionamiento de los envases** recuperados para utilizarlos nuevamente (c'). Como se mencionó en la Sección 6.2, se parte de la hipótesis de que este costo es igual para todos los productos.

Este costo se calculó como la suma del costo de mano de obra y del costo de agua para limpiar el envase. Para el cálculo de ambos, se realizó una simulación de lavado de un balde de nutrición animal.

Este lavado llevó veinte segundos y se consumieron 6,5 litros de agua.

El costo de mano de obra se calculó a partir del salario mínimo por hora dispuesto por el Banco de Previsión Social (BPS) al 12 de abril de 2022. Este costo se dividió hasta llegar al costo de mano de obra por veinte segundos, el tiempo insumido en lavar un envase. Por otro lado, el costo de la utilización de 6,5 litros de agua se calculó a partir de la tarifa de Obras Sanitarias el Estado (OSE), correspondiente a la tarifa industrial variable mayor a 3500m³.

Otro dato necesario para alimentar el modelo es el valor que toma el **stock inicial de envases** en el primer período del primer horizonte de planificación (S_p). Este se calcula a partir de lo que se recupera en el modelo de distribución en un horizonte de planificación previo. Se toma el total de envases recuperados previamente, y se multiplica por un porcentaje que simula la pérdida de envases en el traslado de las canchas de acopio a la planta. Para el caso de estudio base, se toma este porcentaje como un 90%. Es decir, que el 10% de los envases recuperados por los camiones no pasan el filtro de calidad una vez llegados a planta.

Otro parámetro relacionado a la recuperación de envases es el **impacto ambiental de los viajes** realizados por el proveedor de envases (h_v). Dicho parámetro refleja las emisiones de CO₂ equivalente del traslado en camión desde el centro de distribución del proveedor a la planta de NutAgro. Si bien los envases vienen de dos proveedores distintos, ambos se encuentran a una distancia similar de NutAgro. Por lo tanto, se toma un único valor de h_v .

Para el cálculo de h_v , se obtuvo el rendimiento de gasoil promedio de un camión de las proporciones del camión del proveedor. Con la distancia aproximada a los centros de distribución de cada proveedor, se obtuvo el gasoil consumido en un viaje. Se tuvieron en cuenta las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O del gasoil y se convirtieron a CO₂ equivalente según los índices proporcionados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). De esta manera, se desestima la porción de biocombustible del gasoil, la cual es determinada según ANCAP. [5].

Por otro lado, se encuentran las **emisiones asociadas a producir un envase nuevo** (h_p^e). Este dato se obtiene de una publicación sobre el reciclaje y las emisiones de gases de efecto invernadero del polietileno [1]. Dicho documento menciona un rango de emisiones de CO₂ equivalente por tonelada de producción de perfiles de polietileno de alta densidad. Se tomó el promedio de ese rango como el valor de h_p^e para todos los productos por igual.

7.2.2. Datos para la Distribución de la producción

Los modelos de distribución de la producción también cuentan con datos obtenidos a partir de estimaciones. Uno de ellos es **la cantidad de camiones por conjunto**. El conjunto Propio solo contiene un elemento, ya que es un dato proporcionado por la empresa.

Sin embargo, los conjuntos de camiones tercerizados y de agencia deben estimarse. Dicha estimación debe tener en cuenta una cantidad finita de camiones, ya que los conjuntos deben ser definidos en los modelos. A su vez, el problema siempre debe ser factible, por lo que se debe contar con una cantidad de camiones disponibles mayor o igual a la necesaria para cumplir con todos los pedidos. Para ello, se registró la semana con mayor cantidad de pedidos del mes en cuestión. Se obtuvo el día con más pedidos de la semana. Se corroboró que la capacidad máxima era la limitante en los camiones, y se calculó cuántos camiones se precisarían para satisfacer el pico de demanda de ese día. Se supuso que un 75% de ellos serían tercerizados, y el otro 25% camiones de agencia. A estas cantidades de camiones, se les agregó un 20% más de camiones de cada tipo, para cubrir casos de retrasos (backlogging) y dar mayor flexibilidad en los viajes.

De esta manera, el conjunto de camiones tercerizados contiene 5 camiones, y el de agencia contiene 2, como se visualiza en la siguiente tabla:

Conjunto de camiones	Camiones
Propio	Propio ₁
Tercerizado	T _{1ida} - T _{5ida}
Agencia	A _{1ida} , A _{2ida}

Tabla 51: Conjuntos de camiones para el problema sin opciones de retorno.

Los conjuntos de camiones varían en el escenario con recuperación de envases. El conjunto de camiones propios se mantiene igual, con un único camión que puede hacer viajes de ida y vuelta con mercadería. Por otro lado, se agregan conjuntos de camiones tercerizados y de agencia respectivamente, que pueden traer envases de los clientes a la planta de NutAgro. Se suponen conjuntos de camiones de vuelta de igual tamaño a los de ida. El detalle se puede ver en la tabla a continuación:

Conjunto de camiones	Camiones
Propio	Propio ₁
Tercerizado Ida	$T_{1ida} - T_{5ida}$
Tercerizado Vuelta	$T_{1vuelta} - T_{5vuelta}$
Agencia Ida	A_{1ida}, A_{2ida}
Agencia Vuelta	$A_{1vuelta}, A_{2vuelta}$

Tabla 52: Conjuntos de camiones para el problema con opciones de retorno.

El modelo de distribución de la producción con opciones de retorno también agrega un nuevo conjunto: **envases**. Si bien en el modelo de planificación de la producción no se tiene en cuenta el envase de por sí, en el modelo de distribución se debe diferenciar a los productos de los envases. Se define el conjunto de envases como un conjunto análogo al de productos, con una relación uno a uno: para cada tipo de producto, hay un tipo de envase. Dicho conjunto se puede ver plasmado a continuación:

Conjunto	Elementos
Envases de Nutrición animal	$ea_1 - ea_8$
Envases de Nutrición vegetal	$ev_1 - ev_{22}$

Tabla 53: Conjuntos de envases

Ciertos datos claves en el modelo de distribución son el conjunto de **clientes** (N), y el parámetro de **demand** asociada a cada uno de ellos (d_{npt}). Para definir N , se partió de los clientes que realizaron pedidos en el mes de estudio proporcionado por la empresa. Eliminando los clientes del exterior del país (que no son considerados según las hipótesis del modelo) y aquellos que se encontraban como “no definidos” de la planilla, se llegó a un conjunto de 88 clientes.

Sin embargo, de estos 88 clientes se tenía únicamente la información de la región del país a la que pertenecen, no su ubicación específica. Por lo tanto, se agruparon los clientes según las cuatro regiones proporcionadas. Cada región está compuesta por distintas localidades. Por lo tanto, a cada cliente de una región dada se le asignó aleatoriamente una localidad perteneciente a dicha región. Finalmente, se creó el conjunto de clientes como el conjunto de localidades, donde cada localidad contiene la unión de la información de los clientes reales de dicha localidad, como se puede ver en la tabla 54. De esta manera, se consideraron clientes dispersos por todo el país.

Esta simplificación permite un acercamiento a la realidad actual de la empresa. El modelo permite que un camión visite a un único cliente por viaje. A su vez, ciertos pedidos son de una escala mucho menor a la capacidad de los camiones. Por lo tanto, si se tuvieran los 88 clientes como elementos del conjunto N , se efectuaría un exceso de viajes con camiones semi-vacíos, lo cual no refleja la realidad actual. Al considerar las localidades como los elementos del conjunto N , se trabaja como si los clientes fueran centros de acopio, permitiendo que un camión lleve productos de varios pedidos a una misma localidad. Del mismo modo, en cada localidad se concentran los envases disponibles obtenidos de las ventas, para su recuperación.

Localidad	Elemento del conjunto
Canelones	1
Montevideo	2
San José	3
Florida	4
Minas	5
Durazno	6
Maldonado	7
Trinidad	8
Colonia	9
Rocha	10
Mercedes	11
Young	12
Dolores	13
Treina y Tres	14
Paysandú	15
Tacuarembó	16
Melo	17
Salto	18
Rivera	19
Artigas	20
Flores	21

Tabla 54: Conjunto de clientes: N

La definición del conjunto N impactó en la determinación de d_{npt} . Para obtener el parámetro de demanda, se agruparon todos los pedidos reales de una misma localidad y día en un único pedido multiproducto. De esta manera, los datos permiten la “consolidación de pedidos”. Todas las demandas, calculadas en unidades de productos, fueron redondeadas a su siguiente número entero.

Una vez definidos los clientes con sus ubicaciones, se procedió a estimar los costos de visitarlos con los distintos camiones. Como se mencionó anteriormente, los costos de visitar un cliente con un camión de agencia fueron proporcionados por la empresa. A su vez, se proporcionó el costo por kilómetro de utilizar el camión propio. Multiplicando este costo por los kilómetros a los clientes de N , se llegó al **costo de visitar cada cliente con camión propio** (c_n^{vp}). Con la herramienta Google Maps, se midió la distancia en kilómetros entre la planta de NutAgro y las capitales de cada localidad. Esto fue utilizado para estimar los kilómetros insumidos para alcanzar a cada cliente, y por ende los costos de visita respectivos.

La empresa también proporcionó el costo por tonelada por localidad de utilizar un camión tercerizado. Dado que los clientes son las localidades, este dato proporcionado por la empresa se traduce al parámetro denominado **costo de visitar un cliente con el camión tercerizado** (c_n^{vt}).

Otro parámetro del modelo de distribución es el **costo por unidad de producto de generar retrasos en las entregas** (cf_p). Este parámetro se calculó como el 10 % del precio de venta de cada producto.

El **máximo número de viajes que puede realizar el camión propio** (L) se calculó en conjunto a la definición de los **clientes a los cuales el camión propio no puede visitar** (clientes entre N^{min} y N^{max}). Dada una restricción temporal de lo que puede recorrer el camión propio en un día, se definió que este camión puede realizar un máximo de 3 viajes, si visita a los clientes cuya distancia a la planta es menor o igual a la distancia a Treinta y Tres. Por lo tanto, N^{min} y N^{max} corresponden a las localidades de Paysandú y Artigas, es decir, a los clientes 15 y 20 respectivamente.

El **número de activación** de las variables binarias de los viajes (M) debe ser un número lo suficientemente grande como para restringir los viajes. Además, debe tener en cuenta los productos enviados y recuperados en cada viaje. Se calculó como dos veces la capacidad volumétrica del camión más grande. En este caso, corresponde a la del camión tercerizado. Dado que lo enviado y recuperado se mide en unidades, se eligió la capacidad volumétrica sobre la música, ya que el número absoluto en litros es mas grande que el número absoluto en toneladas.

Las **emisiones de CO_{2eq} de visitar a los clientes** (hv_n) se calculan de la misma manera que se

calcularon las emisiones del proveedor en la Sección 7.2.1. Partiendo de la hipótesis de que todos los camiones se calculan por igual, se obtuvo el rendimiento de los camiones. Con este y la distancia a los clientes se calculó el gasoil consumido en llegar a cada localidad. De esta forma, se calcularon las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O y se convirtieron a CO_2 equivalente según los índices proporcionados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) [5].

Un parámetro clave a estimar en el modelo de distribución con opciones de recuperación es el **stock inicial de envases a recuperar en los nodos** (S_{ne}). Para ello, se parte de datos de ventas anteriores. Se estima que un producto de nutrición animal demora aproximadamente una semana en ser consumido, mientras que los productos de nutrición vegetal son pedidos para ser aplicados a la brevedad y de manera instantánea ya que son vertidos en el campo. Teniendo estos plazos en consideración, en conjunto con el tiempo que un cliente puede demorar en llevar los productos a los centros donde llegan los camiones (las localidades), se estima que S_{ne} es igual a las ventas de dos semanas anteriores, multiplicado por un porcentaje de devolución sujeto al comportamiento de los clientes. Este porcentaje se estima en un 80 % en el caso base.

Dado que el valor de S_{ne} depende de datos de ventas anteriores, y solo se cuenta con un mes de datos proporcionados por la empresa, los stocks iniciales de las semanas 3 y 4 del mes en cuestión salen directamente de las semanas 1 y 2 respectivamente. En cuanto a los valores de stock de las primeras semanas, se tomaron las ventas de las semanas 3 y 4 y se multiplicaron por un porcentaje, simulando ventas del mes anterior al proporcionado. El mes anterior se caracteriza por tener demanda levemente menor al mes base, por lo que dicho porcentaje se fijó en 90 %.

Por último, se debió estipular un **porcentaje mínimo a recuperar** de los envases disponibles en los centros de acopio (a). Para el caso base, se definió a en un 50 %.

8. Metodología para la resolución de los modelos

En esta Sección se describe el procedimiento que se llevó a cabo para resolver los modelos de planificación y distribución de la producción, en los casos con y sin opciones de retorno.

8.1. Relaciones entre modelos

Los modelos planteados en el proyecto son dependientes unos de los otros. Los datos de ingreso se basan en las resoluciones de modelos anteriores. A continuación, se describe cómo se realiza la alimentación de parámetros para cada caso.

8.1.1. Relaciones entre los modelos sin opciones de retorno

A partir de los datos descritos en la Sección 7, y de la descripción de los modelos sin retorno de envases, se determinaron los datos correspondientes a cuatro semanas de trabajo dentro de un mes. Las condiciones iniciales de cada horizonte de tiempo, es decir, de cada semana, dependen de las salidas obtenidas al resolver los modelos con los datos de la semana previa. Dicha relación se visualiza en la siguiente Figura 5, y se describe a continuación. En dicha figura, se entiende “PROD” como el modelo de Planificación de la Producción, “LOG” como el modelo de Distribución de la Producción, y a “T” como el horizonte de planificación.

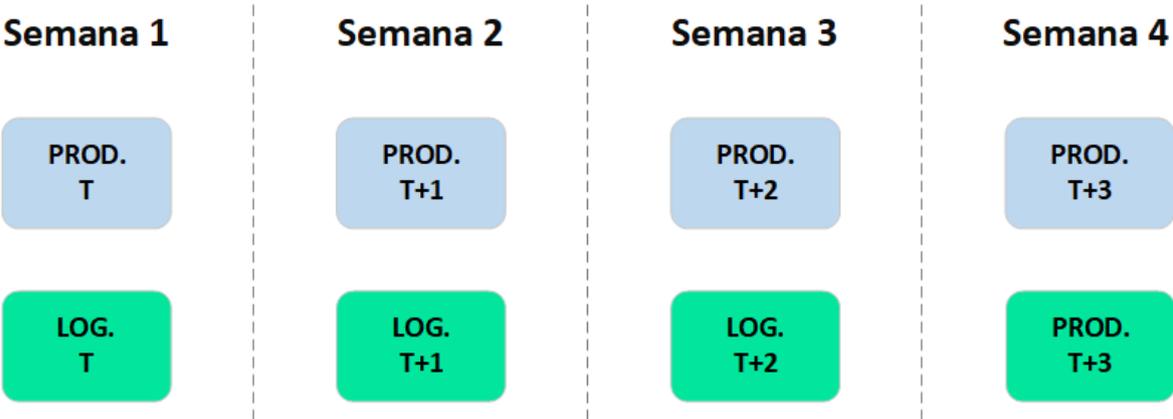
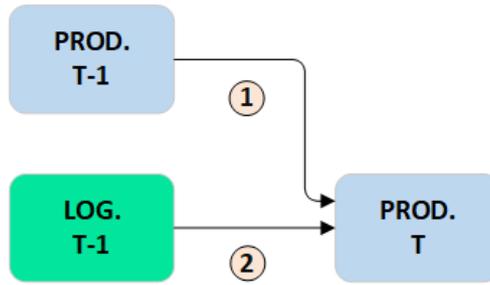


Figura 5: Secuencia de horizontes de tiempo en la resolución de modelos de planificación y distribución de la producción. Fuente: Elaboración propia.

Inventario inicial

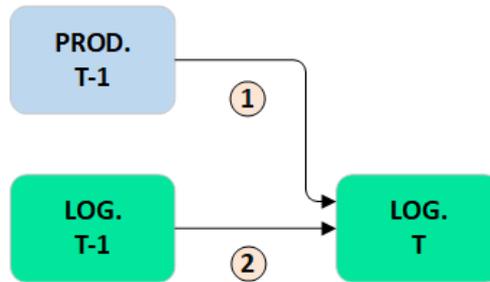
En la planificación de la producción, independiente del nivel de inventario que se tenga al comenzar la semana, se debe producir para satisfacer una determinada cantidad pronosticada. Por ende, el inventario se actualiza período a período en base a dicho inventario inicial y lo que se vaya produciendo en la semana. Por otro lado, al comenzar la misma semana en el modelo de distribución de la producción, se cuenta con el mismo inventario inicial que en el modelo anterior. En este caso, la actualización del inventario se ve afectada por los envíos de productos a los distintos clientes. Se recuerda que no existe alimentación de datos entre modelos dentro de un mismo horizonte de tiempo. Esto significa que la salida conjunta de ambos modelos en el último período de una semana, determinará las condiciones iniciales de la semana siguiente, para ambos modelos - productivo y logístico - por igual.

Considerando lo descrito anteriormente, las condiciones iniciales de la primera semana fueron simplemente impuestas. Sin embargo, para determinar el inventario inicial de la segunda semana, se restan todos los productos enviados a clientes en la primera semana del modelo logístico al inventario del último período de la primera semana del modelo productivo. Este proceso se repite para obtener el inventario inicial de la tercera y cuarta semana. Esto último, puede visualizarse de forma gráfica en las siguientes Figuras 6 y 7.



Relación	Variables modelo: PROD. T-1	Variables modelo: LOG. T-1	Variable modelo: PROD. T
①	Cantidad de unidades a almacenar en el último período $y_{p,t=J}$		Stock inicial de cada producto
②		Demanda total satisfecha $\sum w_{pnvt}$	$y_{p,t=J} - \sum w_{pnvt} = I_p$

Figura 6: Alimentación de datos: Planificación de la producción sin opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.



Relación	Variables modelo: PROD. T-1	Variables modelo: LOG. T-1	Variable modelo: LOG. T
①	Cantidad de unidades a almacenar en el último período $y_{p,t=J}$		Stock inicial de cada producto
②		Demanda total satisfecha $\sum w_{pnvt}$	$y_{p,t=J} - \sum w_{pnvt} = I_p$

Figura 7: Alimentación de datos: Distribución de la producción sin opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.

8.1.2. Relaciones entre los modelos con opciones de retorno

Para modelar lo sucedido a lo largo del mismo mes, pero considerando opciones de retorno, se reitera todo lo indicado en la Sección 8.1.1, y se le agrega lo correspondiente a la recuperación de envases de productos.

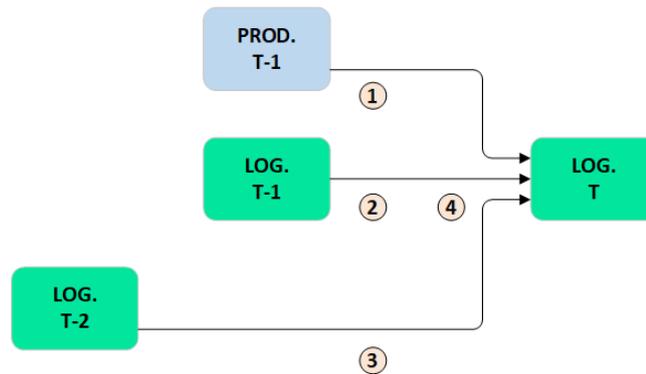
Envases disponibles a recuperar de los clientes en la distribución de la producción

Para actualizar la cantidad de envases disponibles a recuperar en cada cliente semana a semana, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La cantidad inicial de cada envase en cada cliente, en la semana T-1: esta matriz, como se explicó en la Sección 7, se obtiene en base a lo vendido en la semana anteúltima (es decir, en el horizonte de tiempo T-3).

- La cantidad equivalente a lo recuperado por NutAgro en todos los clientes, a lo largo de toda la semana T-1.
- Los envases que se tendrán disponibles la semana entrante (T), debido a las ventas de productos en la semana T-2.

Cabe recordar que no se considera que las canchas de acopio contarán con todos los envases de los productos vendidos. Únicamente un 80 % de las ventas se cuentan como disponibles para su recuperación. Con los parámetros mencionados anteriormente, se obtiene la cantidad disponible de cada envase, en cada cliente como el stock inicial de envases de la semana previa, menos lo recuperado en la semana previa, más los nuevos ingresos de envases en la semana actual. Para el caso de la primera semana, únicamente se consideró el stock inicial como las ventas en dos horizontes de tiempo anteriores. Para visualizar esto mismo de forma más ordenada, la Figura 8 representa lo explicado.



Relación	Variables modelo: LOG. T-2	Variable modelo: PROD. T-1	Variables modelo: LOG. T-1	Variables modelo: LOG. T
①		Cantidad de unidades a almacenar en el último período $y_{p,t=j}$		Stock inicial de cada producto
②			Demanda total satisfecha $\sum w_{pnvt}$	$y_{p,t=j} - \sum w_{pnvt} = I_p$
③	Cantidad entregada de cada producto $\sum w_{pnvt}$			Stock de envases disponibles a recolectar en cada nodo
④			Stock final de envases en cada nodo $s_{ne} - \sum r_{nevt}$	s_{ne}

Figura 8: Alimentación de datos: Distribución de la producción con opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.

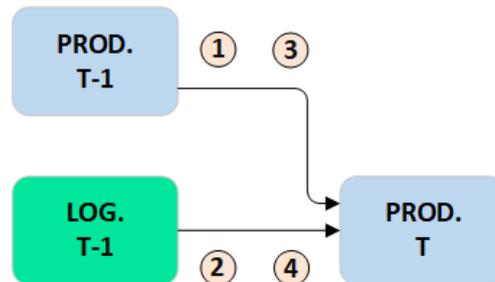
Envases disponibles para la planificación de la producción

Para determinar los datos del modelo de planificación de la producción con opciones de retorno, se debe determinar, semana a semana, el nivel inicial de envases recuperados disponibles. Para ello, se toman en consideración los siguientes puntos:

- La suma de todos los envases recuperados en el modelo de distribución de la producción con opciones de retorno en la semana anterior. Con esto se asegura que el proceso de recuperación de envases, desde que se reciben en la planta hasta que quedan disponibles para su uso en producción, se lleva a cabo de una semana para la siguiente.
- Porcentaje de los envases recuperados en el modelo de distribución que cuenta con calidad aceptable para ser reutilizado en producción. Como se indicó en la Sección 7, corresponde a un 90 %.
- El stock final de envases recuperados sin utilizar en el modelo de planificación de la producción en la semana T-1.

A partir de los puntos listados, se obtiene la cantidad de envases recuperados disponibles en la semana T como el 90 % de los envases recuperados en el modelo de distribución en la semana T-1, sumado al stock final de envases recuperados sin utilizar en el modelo de planificación de la producción en la semana T-1.

Los puntos indicados se pueden visualizar de forma esquemática en la siguiente Figura 9. Dicha Figura incluye expresado en la Sección 8.1.1 con respecto al cálculo del inventario inicial, y agrega lo último descrito con respecto a los envases.



Relación	Variables modelo: PROD. T-1	Variables modelo: LOG. T-1	Variable modelo: PROD. T
①	Cantidad de unidades a almacenar en el último período $y_{p,t=J}$		Stock inicial de cada producto
②		Demanda total satisfecha $\sum w_{pnvt}$	$y_{p,t=J} - \sum w_{pnvt} = I_p$
③	Cantidad de unidades a almacenar del envase recuperado en el último período $s_{p,t=J}$		Stock inicial de envases recuperados de cada producto
④		Cantidad de envases recuperados $\sum r_{nevt}$	$\sum_{nt} r_{nevt} \%cal. + s_{p,t=J} = s_{p,t=0}$

Figura 9: Alimentación de datos: Planificación de la producción con opciones de retorno. Fuente: Elaboración propia.

La metodología descrita para la alimentación de modelos con opciones de retorno, no solo aplica para el set de datos tomado como base, sino que se aplica para todos los casos de experimentación numérica que se describen más adelante.

8.2. Obtención de metas y secuencia general de modelos

Los modelos sin opciones de retorno consisten en la obtención de una solución de costo mínimo, bajo un conjunto de restricciones. Sin embargo, cuando se contemplan opciones de retorno de envases, se persigue además de la minimización de costos, la minimización de emisiones de CO₂ y plástico utilizado, obteniendo así un modelo multiobjetivo.

Para la resolución del modelo multiobjetivo se optó por el enfoque de programación por metas, como se mencionó en la Sección 2.2, donde la función objetivo consiste en minimizar la suma de las variables de desviación de cada una de las metas. Se formularon modelos uniobjetivo para determinar las metas de costos, ambiente y plástico en cada caso. De esta manera, en el caso con opciones de retorno se tienen los siguientes siete modelos:

- Planificación de la producción con opciones de retorno: minimización de costos.
- Planificación de la producción con opciones de retorno: minimización de emisiones de CO₂.

- Planificación de la producción con opciones de retorno: minimización de plástico consumido.
- Planificación de la producción con opciones de retorno en formato programación por metas: minimización de variables de desviación.
- Distribución de la producción con opciones de retorno: minimización de costos.
- Distribución de la producción con opciones de retorno: minimización de emisiones de CO₂.
- Distribución de la producción con opciones de retorno en formato programación por metas: minimización de variables de desviación.

Los modelos que no son de programación por metas, se utilizan únicamente para obtener las metas del problema correspondiente. Estas consisten en el óptimo alcanzado en cada minimización. Cabe destacar que los datos cargados para cada modelo, tanto de obtención de metas como de programación por metas, contienen los mismos valores para cada parámetro.

Por tanto, para llevar adelante la evolución de un mes, semana a semana, se debe primero obtener todas las metas de cada semana a partir de los modelos uniobjetivos, y con ellas definir las metas en los datos de entrada del modelo de programación por metas correspondiente. Con la salida de estos últimos, se actualizan los datos de inventario y envases disponibles de la semana siguiente para todos los modelos, incluyendo obtención de metas y programación por metas. Es decir, una vez finalizada la resolución de los siete de modelos en la primera semana, se calculan las condiciones iniciales de la segunda semana, y así sucesivamente hasta resolver los datos de cuatro semanas seguidas.

A continuación, se enumeran los pasos que describen el proceso llevado adelante. Primero se listan los correspondientes a los modelos sin opciones de retorno, y luego los pasos que contemplan modelos con retorno de envases.

Pasos a seguir sin opciones de retorno de envases

1. Disponer de los datos iniciales para la semana 1.
2. Resolver el modelo de Planificación de la producción.
3. Registrar las salidas obtenidas.
4. Resolver el modelo de Distribución de la producción.
5. Registrar las salidas obtenidas.
6. Definir el inventario inicial de la semana siguiente en base a las salidas de la semana actual, según lo descrito en la Sección 8.1.

Los pasos 2 al 6 se iteran hasta registrar las salidas obtenidas en la cuarta semana. Además, dado que no existe alimentación entre modelos día a día, sino que esta se da semana a semana, puede intercambiarse el orden de los pasos, y en ese caso, otro orden factible sería $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6$.

Por otro lado, si bien no forman parte de la descripción de los modelos sin opciones de retorno, dentro de las restricciones se incluyeron ecuaciones para el cálculo del plástico consumido y de las emisiones de CO₂. La salidas de estas restricciones fueron registradas en los pasos 3 y 5 de cada semana.

En cuanto a los pasos a seguir cuando existen opciones de retorno, los mismos se listan a continuación.

Pasos a seguir con opciones de retorno de envases

1. Disponer de los datos iniciales para la semana 1.
2. Resolver el modelo de Planificación de la producción: minimización de costos.

3. Registrar costo mínimo.
4. Resolver el modelo de Planificación de la producción: minimización de emisiones de CO₂.
5. Registrar emisiones de CO₂ mínimas.
6. Resolver el modelo de Planificación de la producción: minimización de plástico consumido.
7. Registrar la mínima cantidad de plástico consumida.
8. Definir las metas en los datos de la semana actual, para el modelo de Planificación de la producción en formato programación por metas: minimización de variables de desviación, en base a los mínimos obtenidos en los pasos anteriores.
9. Resolver el modelo de Planificación de la producción en formato programación por metas: minimización de variables de desviación.
10. Registrar las salidas obtenidas.
11. Resolver el modelo de Distribución de la producción: minimización de costos.
12. Registrar costo mínimo.
13. Resolver el modelo de Distribución de la producción: minimización de emisiones de CO₂.
14. Registrar emisiones de CO₂ mínimas.
15. Definir las metas en los datos de la semana actual, para el modelo de Distribución de la producción en formato programación por metas: minimización de variables de desviación, en base a los mínimos obtenidos en los pasos anteriores.
16. Resolver el modelo de Distribución de la producción en formato programación por metas: minimización de variables de desviación.
17. Registrar las salidas obtenidas.
18. Definir el inventario inicial en todos los modelos de Planificación de la producción y Distribución de la producción de la semana siguiente, en base a las salidas de la semana actual de los modelos de minimización de variables de desviación, según lo descrito en la Sección 8.1.
19. Definir la cantidad de envases disponibles para recuperar en las canchas de acopio en todos los modelos de Distribución de la producción de la semana siguiente, en base a las salidas de la semana actual de los modelos de minimización de variables de desviación, según lo descrito en la Sección 8.1.
20. Definir la cantidad de envases recuperados disponibles para su utilización en todos los modelos de Planificación de la producción de la semana siguiente, en base a las salidas de la semana actual de los modelos de minimización de variables de desviación, según lo descrito en la Sección 8.1.

De forma análoga a los modelos sin opciones de retorno, los pasos 2 al 20 se iteran hasta registrar las salidas obtenidas en la cuarta semana. A su vez, se puede intercambiar el orden de la obtención de las metas entre sí. A modo de ejemplo, el orden de los pasos 4 → 5 → 6 → 7 → 2 → 3, también es válido. Claramente, esto también aplica sobre el orden de obtención de las metas en la distribución de la producción.

A continuación, la Figura 10 ayuda a visualizar la obtención de metas durante este último proceso.

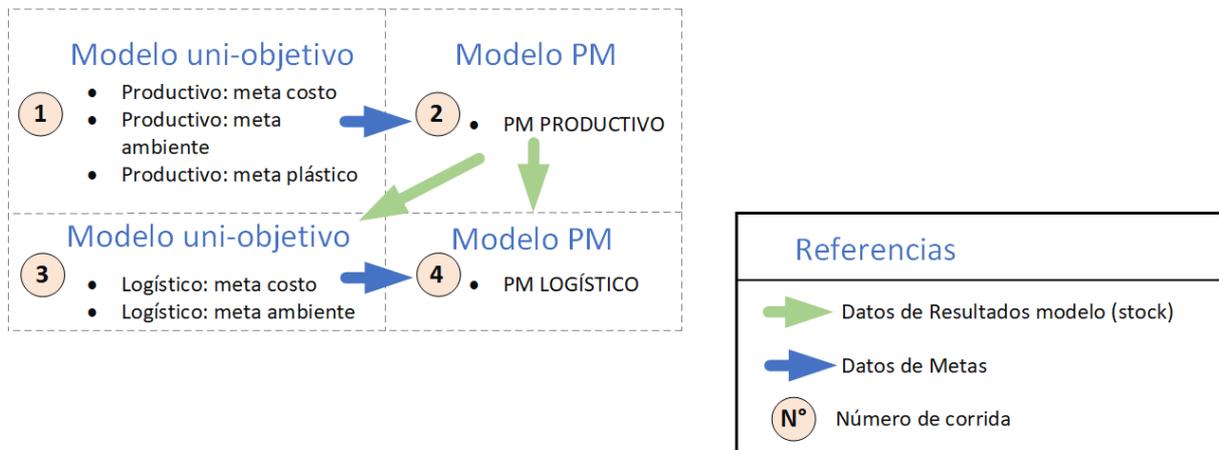


Figura 10: Obtención de metas de cada modelo.

9. Análisis de resultados del caso base

Esta Sección presenta un análisis de los resultados obtenidos de los modelos con los datos de la Sección 7. A su vez, se hace un análisis comparativo entre lo obtenido en los modelos con y sin opciones de retorno, respectivamente.

Para el caso de estudio, los modelos fueron codificados en AMPL y resueltos con Gurobi 9.5.1. Se utilizó una computadora con procesador AMD Ryzen 7 4700U con Gráficos Radeon 2.00 GHz, y con 16 GB de memoria RAM.

El tiempo que le lleva al *solver* resolver cada problema se presenta en la siguiente Tabla 55. Dichos tiempos contemplan los segundos de CPU del sistema utilizados por todos los comandos de resolución, más los segundos de CPU de usuario utilizados por todos los comandos de resolución.

Modelo	Segundos
Planificación de la producción sin opciones de retorno	0.015625
Distribución de la producción sin opciones de retorno	1.0625
Planificación de la producción con opciones de retorno	0.015625
Distribución de la producción con opciones de retorno	3.79688

Tabla 55: Tiempo de cómputo (CPU) requerido para resolver cada modelo con Gurobi, expresado en segundos.

9.1. Planificación de la producción sin opciones de retorno

La producción se comportó de forma idéntica para todas las semanas, es decir, se produjeron exactamente los mismos productos, en la misma cantidad, los mismos días. Esto es coherente, ya que todas las semanas se debe satisfacer una misma demanda pronosticada. A su vez, debido a que producir implica costos y se busca minimizarlos, la solución óptima no sugiere exceder la producción de la demanda pronosticada para ninguna de las semanas.

En cuanto a la producción de la línea de nutrición vegetal, divide la producción en cantidades iguales en todos los días de la semana para todos los productos. Para los productos de la línea nutrición animal, sí se consolida su producción en una menor cantidad de días. A su vez, como se mencionó en la Sección 7.2.1, existen dos productos del tipo Mix dentro de esta línea que cuentan con costo de preparación. Por tanto, sus producciones se concentran en dos días de cada semana, ya que la capacidad de producción diaria no es suficiente para producir todo lo necesario.

En cuanto a la capacidad ociosa de las líneas, la siguiente Tabla 56 demuestra como la línea de nutrición animal cuenta con una capacidad ociosa de entre 73 % y el 100 %, ya que en el último período de cada semana ésta se mantiene inoperativa.

Período	% de capacidad ociosa
1	0
2	73
3	89
4	77
5	100

Tabla 56: Capacidad ociosa por período de la línea de nutrición animal durante la semana 1.

En el caso de nutrición vegetal, dado que la producción es idéntica diariamente, la capacidad ociosa es siempre del 74 %, según lo indica la Tabla 57.

Período	% de capacidad ociosa
1	74
2	74
3	74
4	74
5	74

Tabla 57: Capacidad ociosa por período de la línea de nutrición vegetal. El comportamiento se repite para todas las semanas.

Por ende, si bien la recomendación de planificación se mantiene invariante para cada horizonte de planificación, existen diferencias en las recomendaciones para las distintas líneas de producción. Mientras que en nutrición animal la capacidad ociosa es distinta en cada período, en nutrición vegetal es constante.

9.2. Distribución de la producción sin opciones de retorno

En todos los períodos de tiempo, al menos dos camiones tercerizados fueron utilizados. Cabe destacar que la tarifa asociada a entregar un producto con un camión tercerizado depende del cliente. Por otro lado, los costos del camión propio dependen del cliente visitado, pero no de la cantidad entregada. Por último, los costos de agencia constan de un cargo fijo alto por hacer el viaje, más un cargo dependiente de la cantidad de producto entregado. Además es independiente del cliente visitado y es menor que el cargo variable del camión tercerizado. Esta definición de costos hace que no exista una forma más barata para todos los pedidos por igual, sino que es dependiente del tamaño del pedido y del cliente.

Como consecuencia, el camión tercerizado es la mejor opción cuando la demanda es pequeña. Sin embargo, cuando los pedidos son de gran tamaño, el costo fijo de agencia se diluye en toda la mercadería enviada, y, por tanto, se justifica este otro medio de transporte. Esta segunda alternativa es preferida con frecuencia en las semanas 3 y 4, donde los pedidos son más grandes. Dado que en el modelo presentado no existe un cargo fijo asociado a visitar un cliente con el camión tercerizado, se abastece a un mismo cliente con varios camiones tercerizados distintos. Además, dependiendo de como se conforma la demanda del cliente, los viajes se componen de distintos productos o de un único producto.

En cuanto al camión propio, la cantidad de viajes realizados por día oscila entre cero y dos. A su vez, en todas las semanas se realizan entregas de pedidos por adelantado. Existen costos de penalización por retrasos en los casos en que satisfacer la demanda con el tipo de traslado disponible es más caro que el costo por retraso de ese producto.

9.3. Análisis global sin opciones de retorno

A modo general, se presentan en la siguiente Figura 11 la composición de los costos totales en términos relativos. Se entiende como “PROD” el modelo de Planificación de la Producción, y como “LOG” el modelo de Distribución de la Producción. Se puede visualizar que los costos del modelo de Planificación de la Producción son ampliamente superiores, y estos se atribuyen a su alta tarifa de materias primas y operación (sin contar los envases).

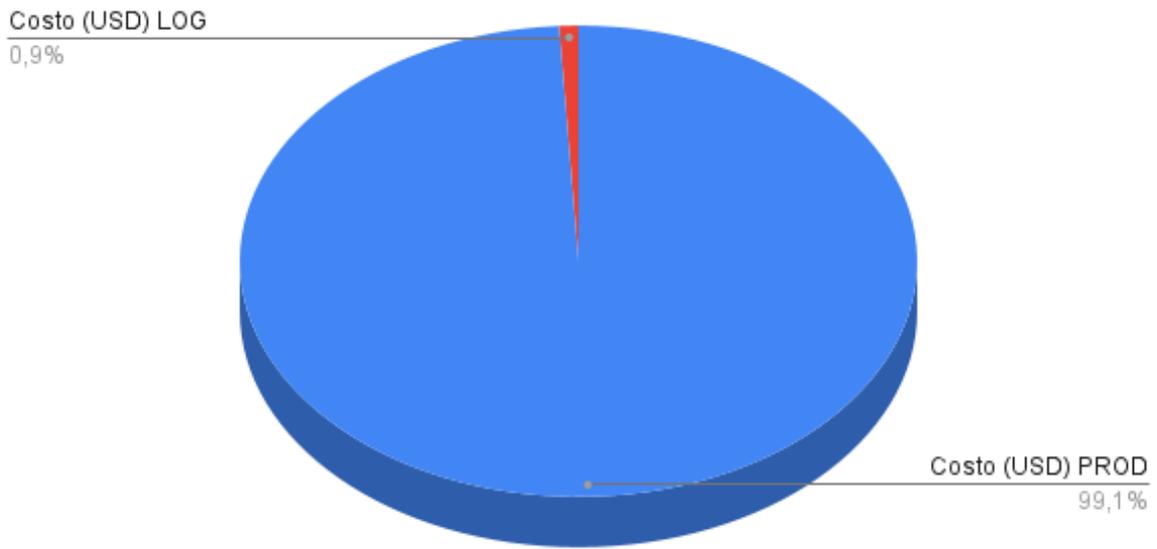


Figura 11: Relación de costos sin opciones de retorno.

Además, se incluyó en cada modelo la ecuación de cálculo de emisiones de toneladas de CO₂ equivalente, sin interferir con el resto de las restricciones ni con el objetivo de estos. El aporte relativo de cada modelo a las emisiones totales pueden visualizarse en la siguiente Figura 12, segregando las emisiones del modelo de Planificación de la Producción y Distribución de la producción. Cabe destacar que la mayor parte de las emisiones del modelo de Planificación de la Producción son “indirectas”, dado que estas se atribuyen a la producción de un envase plástico.

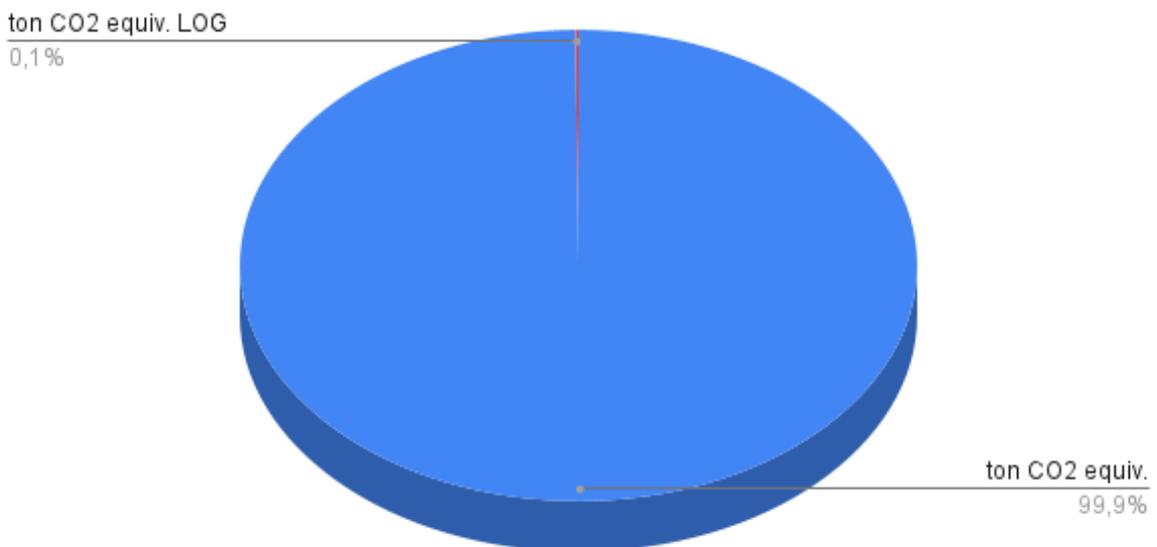


Figura 12: Relación de emisiones de CO₂ equivalente sin opciones de retorno.

9.4. Planificación de la producción con opciones de retorno

Al igual que en el modelo sin opciones de retorno, la línea de nutrición animal consolida la producción de los distintos productos en la menor cantidad de días posible. Por lo tanto, todos los productos necesarios para satisfacer el pronóstico son producidos en un día, a excepción de los productos tipo Mix.

En cuanto al uso de los envases recuperados, dado que el costo de su reacondicionamiento es inferior al de consumir uno nuevo, siempre que se cuente con stock de envases recuperados, estos serán los preferidos para cumplir con el pronóstico. Además, esto influye de forma positiva en los otros objetivos, ya que se minimiza el consumo de plástico, así como las emisiones de CO_2 indirectas. En consecuencia, la producción de la línea de nutrición animal varía semana a semana, ya que depende del stock disponible de envases recuperados, de la capacidad de la línea, y los costos de preparación de los productos del tipo Mix. Esto mismo sucede en la línea de nutrición vegetal, pues también depende de la cantidad recuperada de bidones. De todas formas, la cantidad total producida por período es igual en los modelos con y sin retorno de envases.

Los únicos casos en los que no se satisfizo el pronóstico enteramente con envases recuperados, fue cuando este stock no era suficiente. Por ende, en esos casos, el stock final de envases recuperados es cero, y se debe acudir a nuevos envases para completar la producción.

Sin embargo, en la línea de nutrición vegetal, al igual que en el modelo sin opciones de retorno, no se consolida la producción de cada producto, sino que se produce la misma cantidad de cada producto de forma diaria, en todos los horizontes de tiempo. En el caso del modelo con retornos, la producción se compone de productos con envases nuevos y productos con envases recuperados. En cuanto a la capacidad ociosa de las líneas, en el caso de nutrición vegetal los resultados son exactamente iguales al modelo sin opciones de retorno, pues la planificación de la producción es idéntica. En el caso de nutrición animal, se debe recordar que la cantidad total producida es la misma que en el modelo sin opciones de retorno, por lo que la capacidad también es suficiente.

9.5. Distribución de la producción con opciones de retorno

En el modelo de distribución de la producción, con opciones de retorno, sucede que todos los camiones realizan viajes. En el caso de los camiones de agencia, estos son utilizados cuando no existe disponibilidad de otros medios, o cuando las características del pedido (combinación cantidad de productos y cliente) hacen que sea más rentable distribuir con este medio en vez de con un camión tercerizado. Al igual que en el modelo sin opciones de retorno, no existe un único tipo de transporte preferido, sino que varía según las características de la demanda a satisfacer.

El camión propio es utilizado en todas las semanas menos en la primera, y en una única ocasión, visita a dos clientes distintos en un mismo período. En consecuencia, este camión no alcanza el máximo de visitas diarias, equivalente a tres, en ningún momento. A su vez, tampoco se alcanza la demanda del cliente más alejado, dentro de los que el camión propio puede visitar. Esto también es debido a sus altos costos y capacidad inferior a la del resto de las modalidades. Sin embargo, cuando este se utiliza, va a tope. Además, se hacen envíos a clientes alcanzables por dicho camión, con camiones tercerizados o de agencia, dado los altos costos del primero. Asimismo, cuando se usó el camión propio para enviar productos a determinado cliente, este retornó con todos los envases que había para su reacondicionamiento.

Por otro lado, los pedidos son todos satisfechos en tiempo y forma, incluso en algunos casos por adelantado. Por ende, no se pagan “multas” por retraso. Cuando es necesario adelantar productos de un pedido, la solución indica que es preferible enviar un poco de cada producto que integra el pedido, en vez de llevar mayores cantidades en una determinada concentración de productos.

Existe un caso en el que la capacidad de un camión tercerizado (el tipo de mayor capacidad) no es suficiente para enviar todo lo pedido por un cliente durante el horizonte temporal. La solución indica que en ese escenario la demanda debe satisfacerse con más de un viaje, lo cual es coherente.

Es importante destacar que, en el modelo sin retornos, el modelo era indiferente a las emisiones de CO_2 equivalente. Por lo tanto, siempre que el costo de enviar los productos no cuente con un costo fijo, es “equivalente” realizar varios viajes para enviar el total de los productos, o concentrar toda la mercadería en un único viaje. Sin embargo, dado que ahora también se busca minimizar dichas emisiones, se minimiza la cantidad de viajes realizados, es decir, lo indicado con la variable binaria z .

Por otro lado, se agrega la restricción que obliga a traer determinado porcentaje de envases, dentro de los totales disponibles en las canchas de acopio. Esto genera que se hagan más viajes en total. La demanda ingresada es sustancialmente más alta en las semanas tres y cuatro, si se las compara con la demanda de las semanas uno y dos. Como consecuencia, los costos totales de esas semanas son mucho más altos que en las primeras dos. Además, las emisiones aumentan conforme aumentan los viajes realizados (ver Figuras 13 y 14).

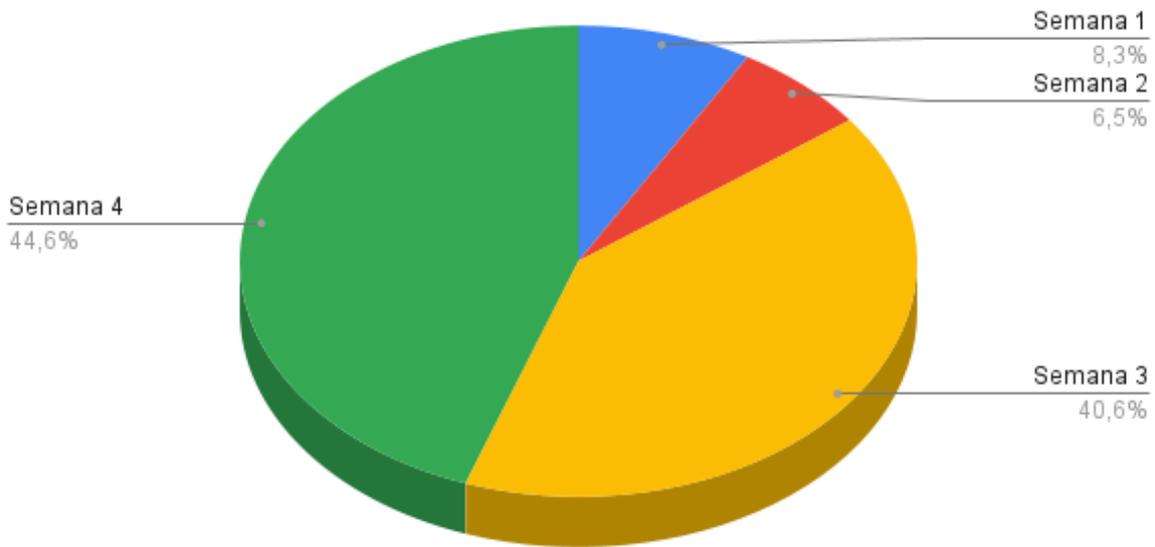


Figura 13: Costos semanales en el modelo de de Distribución de la producción, con opciones de retorno.

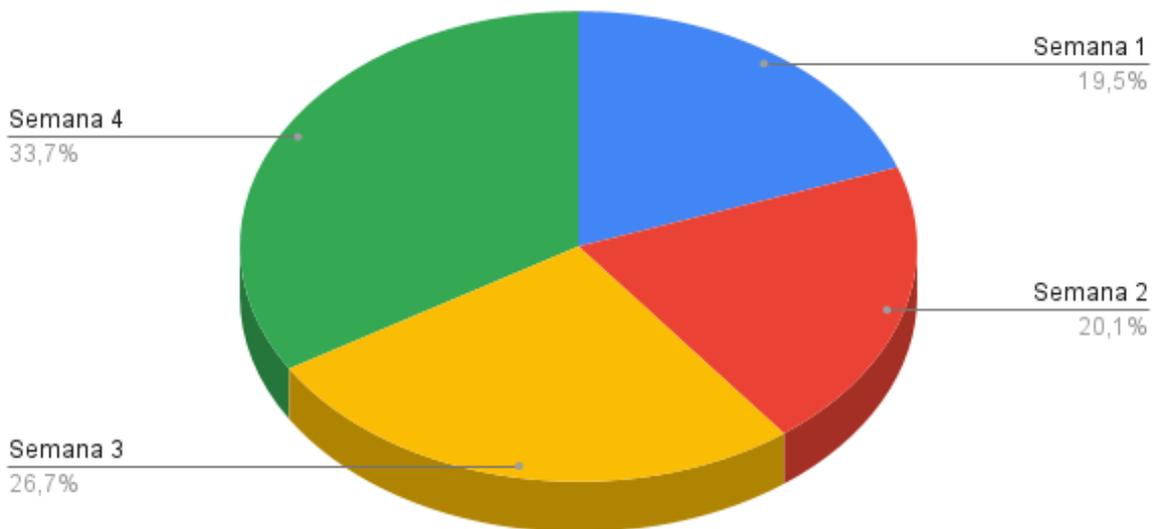


Figura 14: Emisiones semanales en el modelo de de Distribución de la producción, con opciones de retorno.

En términos relativos, si se comparan a las semanas uno y cuatro, los costos totales de la semana cuatro son cerca de 4,4 veces más altos (un aumento del 436 %). En cambio, las emisiones ambientales aumentan en un 74,3 %. Esto significa que el modelo es mucho más sensible a los aumentos de demanda en términos económicos que ambientales.

En cuanto a la desviación de los costos y emisiones totales de sus respectivas metas, por nombrar un ejemplo, existe una desviación positiva de casi 9 USD en los costos en la tercera semana. En términos relativos significa un 1,07 % de desviación con respecto a la meta. Sin embargo, las desviaciones

ambientales sí son significativas en términos relativos. En esa misma semana, se obtuvo una desviación positiva de las emisiones de CO₂ equivalente de 0,306 toneladas, cuando la meta de dicho horizonte eran 1,095 toneladas. En términos relativos, esto significa una desviación del 27,9 %.

La cantidad de envases recuperados en cada semana coincide con el porcentaje mínimo que se obliga a recuperar (50 %), y, además, coincide que se recupera a cada envase en su 50 % de los disponibles. Esto se debe a que recuperar envases implica costos cuando se trata de camiones tercerizados o de agencia. Además, el camión propio tiene un costo fijo elevado, y si bien la vuelta es obligatoria, y por tanto “gratuita”, el pedido debe ser realmente grande, y contar con envases recuperables, para que se justifique su viaje.

9.6. Análisis global con opciones de retorno

En términos globales, la composición de los costos totales pueden reflejarse en la Figura 15, así como la Figura 16 presenta la composición las emisiones globales de los modelos con opciones de retorno.

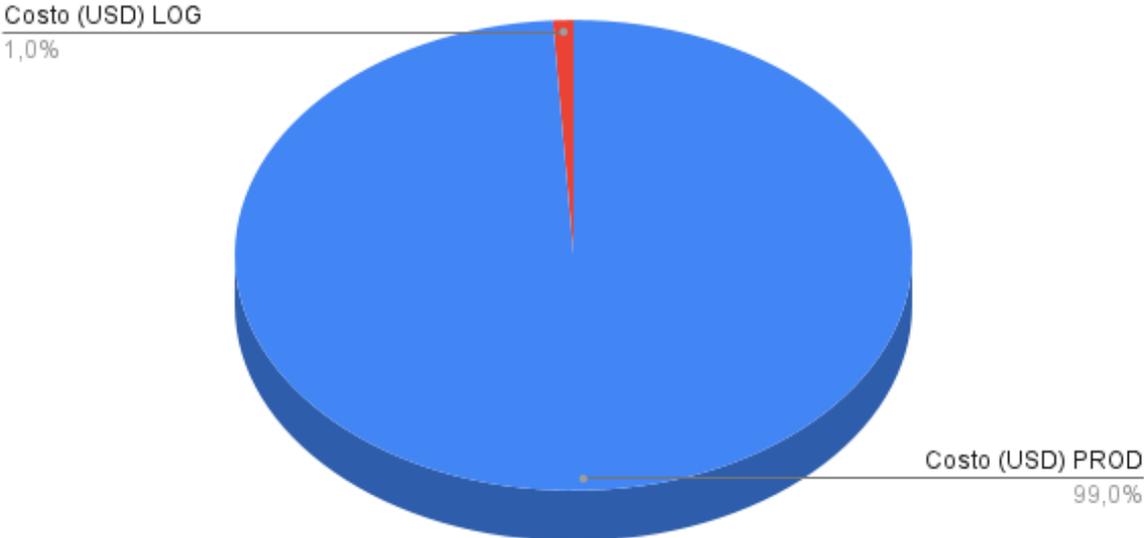


Figura 15: Costos totales en los modelos de planificación y distribución de la producción, con opciones de retorno.

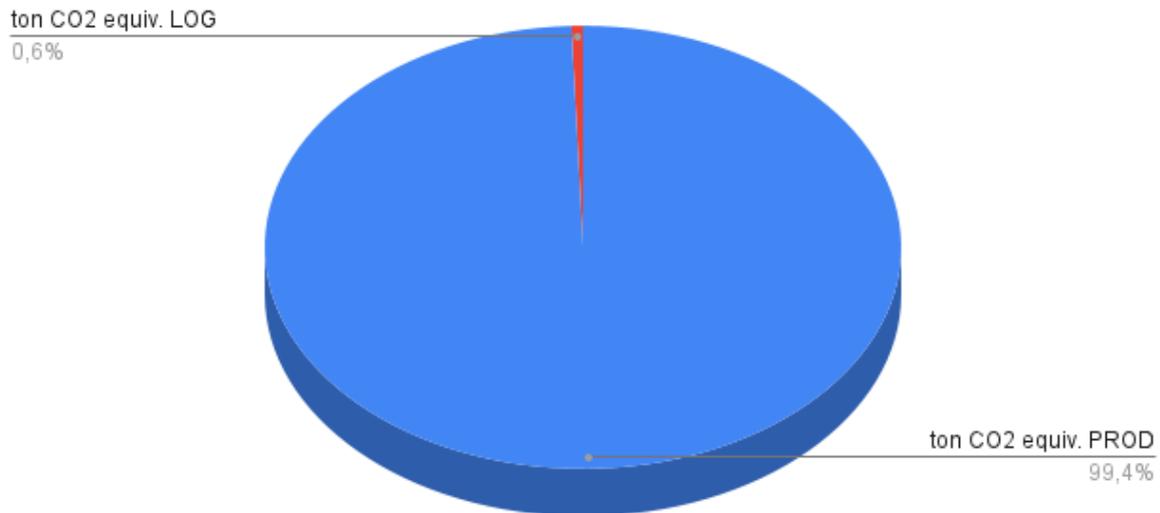


Figura 16: Emisiones totales en los modelos de planificación y distribución de la producción, con opciones de retorno.

Nuevamente, los costos presentes en el modelo de planificación de la producción son altamente superiores al modelo de distribución de la producción. A continuación, se compararán los resultados obtenidos en los modelos sin opciones de retorno con estos últimos.

9.7. Comparación entre modelos con y sin opciones de retorno

En términos económicos, para satisfacer el mismo pronóstico de demanda, se necesitan 211.594,4 USD en el caso sin retornos, mientras que en el caso con retornos se puede cumplir con 202.226,8330 USD. Por ende, existe un ahorro del 4,43 %, debido al menor consumo de plástico nuevo, representado por una totalidad de 2.171 envases.

Sin embargo, los costos de recuperar dichos envases en el modelo de distribución de la producción significaron un aumento del 1,81 % con respecto al modelo que solo satisface la demanda con el envío de productos. En términos absolutos, estos son 35,6 USD de diferencia.

Los costos globales cuando no existen retornos son de 213.555,5 USD, mientras que, con opciones de retorno, los costos globales son 204.223,5 USD. Por lo tanto, existe un ahorro de 9.332 USD, es decir de un ahorro del 4,36 %.

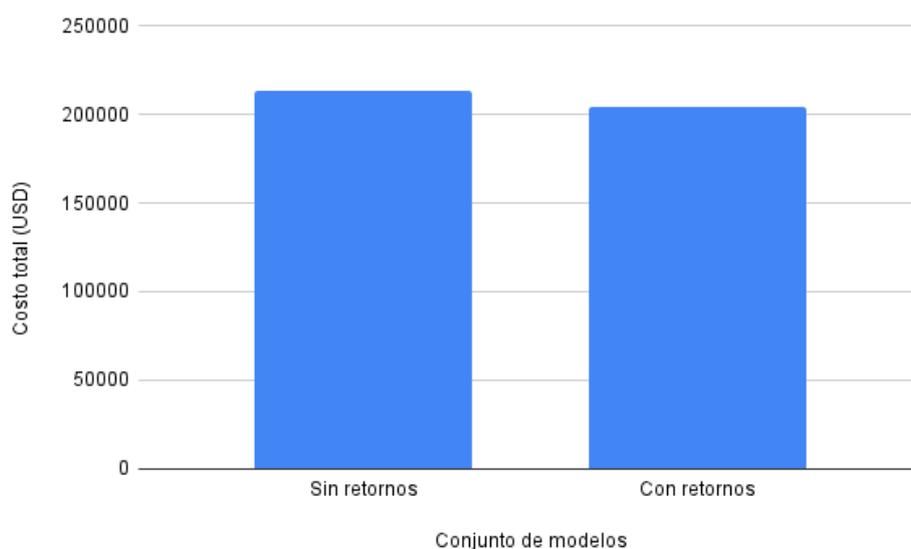


Figura 17: Comparativos de costos totales, con y sin opciones de retorno.

Por otro lado, en términos ambientales, las emisiones que se evitan al producir con envases recuperados son 2.937,58 toneladas de CO₂ equivalente, traducido en un ahorro del 76,64 %. En el caso de la distribución de la producción, también se aprecian ahorros, dado que anteriormente no existía preocupación por dichas emisiones, y luego se priorizan minimizarlas. En otras palabras, el aumento de viajes realizados para recuperar envases, fue inferior a la reducción de viajes para enviar productos a clientes en pos de satisfacer la demanda, ya que ahora se concentran los envíos en la menor cantidad de visitas posibles. Por lo tanto, se emiten 0,488 toneladas de CO₂ equivalente menos, que representan un ahorro del 8,51 %. En suma, se emiten 2.938,07 toneladas menos de CO₂ equivalente cuando se contemplan retornos de envases, es decir, un 76,54 % menos (Ver Figuras 18, 19 y 20).

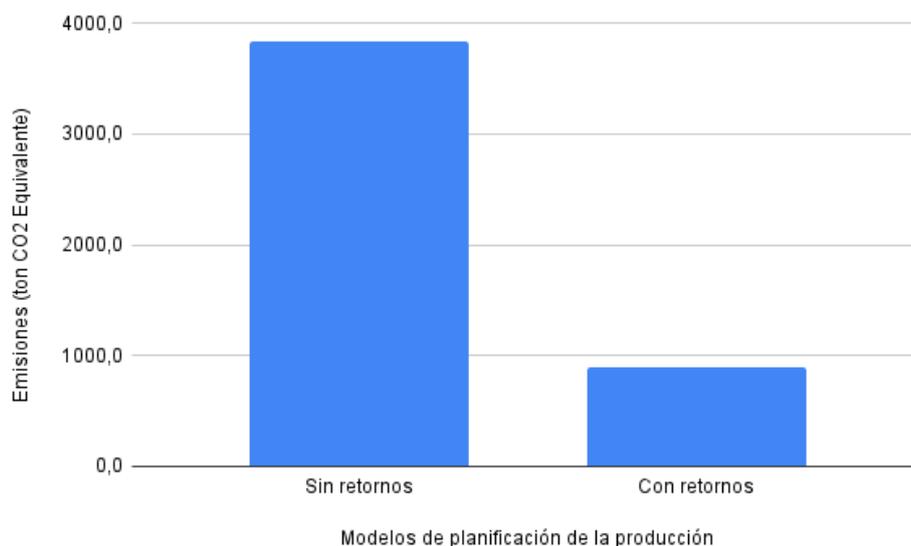


Figura 18: Comparativos de emisiones de los modelos de Planificación de producción, con y sin opciones de retorno.

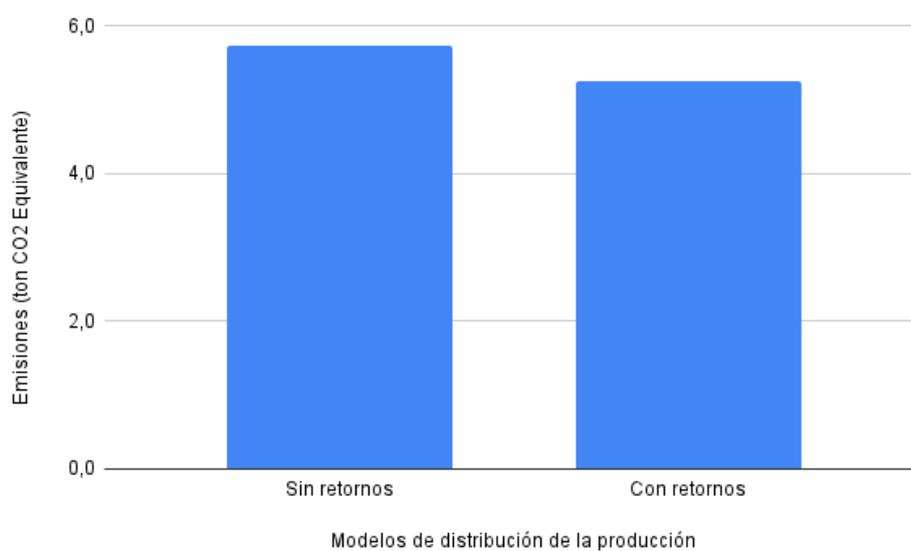


Figura 19: Comparativos de emisiones de los modelos de Distribución de producción, con y sin opciones de retorno.

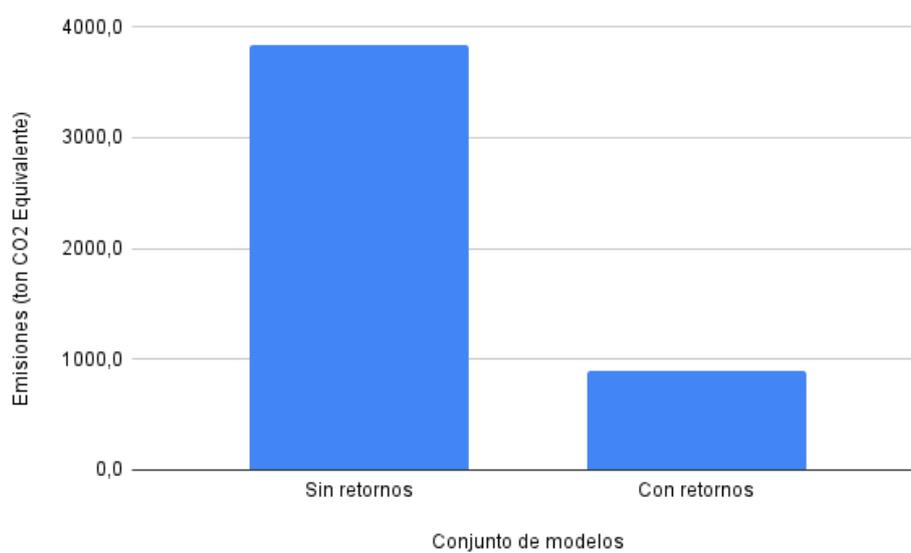


Figura 20: Comparativos de emisiones totales, con y sin opciones de retorno.

10. Experimentación numérica

Una vez obtenidos y analizados los resultados del caso de estudio y presentados en la Sección 9, se procedió a realizar una experimentación numérica de los modelos con opciones de retorno. Este análisis consiste en realizar pequeños cambios en los parámetros o modelo, y evaluar el comportamiento de la solución frente a los resultados del caso base de la Sección 9.

El análisis de experimentación numérica se considera útil para poder evaluar cómo cambian los valores de las soluciones óptimas de cada caso asociados a los costos, las emisiones y la cantidad de plástico consumida.

Para realizar este análisis se consideran los siguientes casos:

- Variación del porcentaje de devolución de envases de los clientes a las canchas de acopio.
- Maximización de recuperación de envases con una nueva función objetivo, variando el porcentaje de devolución de envases de los clientes a las canchas de acopio.
- Variación del porcentaje de descarte en el control de calidad realizado en la planta.
- Aumento de demanda con respecto al caso base.
- Incorporación de otro camión propio.

De esta forma, la empresa NutAgro puede evaluar los resultados frente a distintas situaciones de demanda y valores estimados de los parámetros.

A continuación, se presenta cada caso, en donde se describe el interés del análisis, el proceso de determinación de los parámetros a estudiar y un análisis de los resultados. En todos los casos presentados, los modelos fueron codificados en AMPL y resueltos con Gurobi 9.5.1. Se utilizó una computadora con procesador AMD Ryzen 7 4700U con Gráficos Radeon 2.00 GHz, y con 16 GB de memoria RAM.

10.1. Porcentaje de devoluciones de clientes a las canchas de acopio

Este caso de experimentación numérica consiste en variar la cantidad de devoluciones de envases que realizan los clientes a las canchas de acopio. Se considera importante realizar este caso de análisis ya que la cantidad de envases devueltos por los clientes es un dato que no se puede estimar con certeza.

10.1.1. Obtención de datos de análisis

La cantidad de envases disponibles a recolectar en cada cancha de acopio es el porcentaje de las ventas en dos horizontes de planificación previos. Como se mencionó en la Sección 7.2, los resultados obtenidos en el caso base de estudio consideran que el porcentaje de devolución de envases de los clientes a las canchas de acopio es de un 80 %. El caso de análisis de esta Sección considera un porcentaje de recuperación de un 60 % y un 100 % de las ventas.

10.1.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base

Porcentaje de recuperación de un 60 %

En el modelo de planificación de la producción, los resultados obtenidos en el caso de un porcentaje de recuperación del 60 % respecto al caso base representan un aumento del costo de 2.110 USD. Esto representa un aumento de un 1 %. Por otro lado, la cantidad de toneladas de CO₂eq emitidas en el caso nuevo es de 689 toneladas de CO₂eq más respecto al caso base. Esto representa un aumento del 77 %. Por último, el nuevo caso requiere utilizar 931 unidades de envases de plástico más que el caso en donde el porcentaje de recuperación es de un 60 %, lo que implica un aumento de 43 % de plástico utilizado.

En el modelo de distribución de la producción, los costos y las emisiones ambientales asociados a la situación de un porcentaje de recuperación del 60 % de envases no tienen grandes diferencias respecto a los resultados obtenidos en el caso base. En ambos casos, se tiene una diferencia menor a un 1 %.

Porcentaje de recuperación de un 100 %

Los costos asociados al modelo de planificación de la producción, donde el porcentaje de recuperación es del 100 % de los envases vendidos, disminuyen en 1.813 USD respecto al caso base. Esto

representa un ahorro del 0,89 %. Sin embargo, las emisiones de toneladas de CO₂eq y la cantidad de plástico utilizada tienen una mayor variación. Las emisiones ambientales disminuyen en 595 toneladas de CO₂eq, lo que equivale a un 67 %. Por otro lado, en el caso base se utilizan 794 unidades más de plástico que las utilizadas en este caso de análisis. En caso de recuperar el 100 % de los envases vendidos, se tendría que usar un 37 % menos de envases nuevos en producción.

Respecto a los resultados obtenidos en el problema de distribución de la producción, las variaciones de los costos y emisiones ambientales respecto al caso base se pueden considerar despreciables. Ambos aumentan en una cantidad menor al 1 %.

10.1.3. Comparación global de los escenarios

En términos generales, considerando tanto los resultados del modelo de planificación de la producción como el modelo de distribución de la producción, en el caso base en donde se recupera el 80 % de los envases de los productos vendidos el costo es de 204.224 USD. Como se puede observar en la Figura 21, al recuperar únicamente el 60 % de los envases, el costo incrementa a 206.327 USD, lo que representa un aumento de un 1 % respecto al caso base. Por otro lado, al recuperar el 100 % de los envases, los costos disminuyen en menos de un 1 % respecto al caso base, tomando un valor de 202.418 USD.

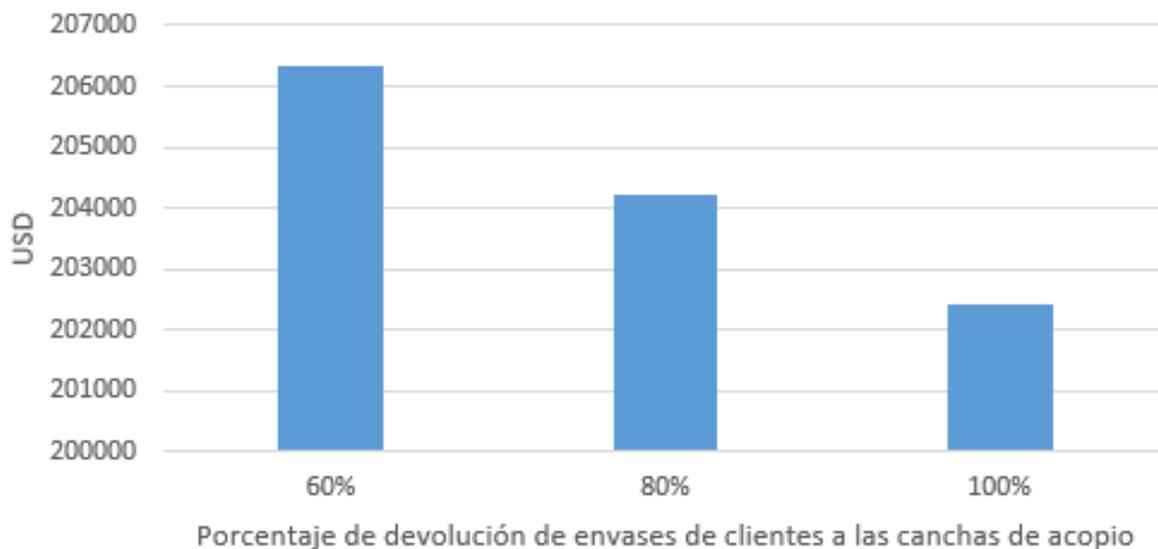


Figura 21: Porcentaje de devolución - Análisis del costo.

Evaluando el comportamiento de las emisiones ambientales de ambos modelos, en el caso base de análisis se emiten 901 toneladas de CO₂eq. Por otro lado, las emisiones ambientales en caso de recuperar el 60 % de los envases vendidos aumentan a 1.589 toneladas de CO₂eq. Esto representa un aumento del 77 % de emisiones respecto al caso base. Como se puede observar en la Figura 22, las emisiones ambientales al recuperar el 100 % de los envases disminuyen un 66 % respecto al caso base, ya que se emiten únicamente 305 toneladas de CO₂eq.



Figura 22: Porcentaje de devolución - Análisis de las emisiones ambientales.

Por último, la cantidad de plástico utilizada se evalúa únicamente en el modelo de planificación de la producción, ya que representa la cantidad de envases nuevos necesarios a utilizar al momento de producir. Mientras que en el caso base se utilizan 2.171 unidades de plástico, en el análisis en donde se recupera el 60 % de los envases vendidos, la cantidad de plástico utilizada en producción es de 3.102 unidades. Esto representa un aumento del 43 % de plástico utilizado. Por otro lado, en caso de que los clientes devuelvan el 100 % de los envases de los productos que compraron, la cantidad de plástico necesaria para utilizar en producción es de 1.377 unidades, como se puede observar en la Figura 23. Esto representa una disminución en el uso de plástico del 37 % respecto al caso base.



Figura 23: Porcentaje de devolución - Análisis de la cantidad de plástico.

Luego de realizar estos casos de análisis, se puede observar que la variación del porcentaje de envases devueltos por los clientes a las canchas de acopio no ocasiona grandes cambios en las soluciones de los costos. Sin embargo, los valores de las emisiones ambientales y la cantidad de plástico tienen una mayor variación.

Las diferencias obtenidas están vinculadas en mayor medida a los resultados del modelo de planificación de la producción. Esto es acorde a lo esperado ya que, si bien impacta en el stock de envases a recuperar de las canchas de acopio, las diferencias de los viajes necesarios no varían en gran medida. Por otro lado, el porcentaje de recuperación impacta directamente en la cantidad de plástico nuevo a utilizar en producción. Al incrementar el porcentaje de devolución de envases de los clientes a las canchas de acopio, se recuperan más envases, por lo que disminuye la necesidad de producir utilizando envases nuevos. Por esta razón, disminuyen las emisiones de la producción de los envases nuevos y las emisiones asociadas a los viajes de abastecimiento de insumos que realiza el proveedor, aunque este último con aportes poco significativos.

10.2. Maximización de la recuperación de envases

Se plantean los modelos incorporando un objetivo destinado a maximizar la recuperación de envases que recolectan los camiones desde las canchas de acopio a la planta. Como se mencionó en la Sección 7.2.2, el modelo base presenta una restricción en la que se obliga a los camiones a recuperar al menos el 50 % del stock de envases de todas las canchas de acopio. En esta Sección se plantea maximizar la recuperación de envases, por lo que es necesario realizar algunas modificaciones al modelo de distribución de la producción.

En primer lugar, se elimina la restricción anteriormente mencionada en donde se obliga a recuperar un porcentaje del stock de envases. En segundo lugar, es necesario incorporar un objetivo al modelo de distribución, para lo cual se crean nuevos parámetros y variables de decisión, se realizan modificaciones en la función objetivo y se añade una restricción. A continuación, se detallan dichos cambios realizados en el modelo.

- **Parámetros:** Se agregan parámetros correspondientes a las metas asociadas a este objetivo.

MRecup: Meta a alcanzar asociada a la recuperación de envases vendidos.

- **Variables de decisión:** Se agregan variables de desviación positivas y negativas correspondientes al objetivo.

n^r : Desviación negativa de la recuperación de envases.

p^r : Desviación positiva de la recuperación de envases.

- **Función objetivo:**

Se agrega un término a la función objetivo asociado a la maximización de envases recuperados. Como se quiere maximizar este atributo, la variable de desviación no deseada que se debe poner en la función objetivo es la negativa. Esta variable se normaliza dividiéndola entre su meta correspondiente. De esta forma, se obtiene un problema de programación por metas ponderadas con ponderación 1. La nueva función objetivo se puede observar a continuación:

$$\min (p^c/MCosto + p^a/MAmb + n^r/MRecup) \quad (81)$$

- **Restricciones:** También es necesario agregar la siguiente restricción al problema, en donde se relaciona el objetivo, las variables de desviación y la meta.

$$\sum_{n,e,v^{ID},v^{VTA},t} r_{nevt} + n^r - p^r = MRecup \quad (82)$$

Una vez realizado los cambios al modelo, este análisis de experimentación numérica estudia distintos

escenarios de la cantidad de envases disponibles a recuperar. Al igual que la Sección 10.1, se varía la cantidad de devoluciones de envases que realizan los clientes a las canchas de acopio. Se abarcan tres escenarios, en donde el porcentaje de devolución de envases varía entre el 60 %, 80 % y 100 % de los productos vendidos anteriormente. El análisis de los resultados de esta experimentación numérica se comparan frente a los resultados obtenidos del escenario con el mismo valor del porcentaje de recuperación presentados en la Sección 10.1.

10.2.1. Obtención de datos de análisis

Como se mencionó en la Sección 7.2, la cantidad de envases disponibles a recolectar en cada cancha de acopio es un porcentaje de sus ventas de dos horizontes de planificación previos. Para ello, se tienen

en cuenta las ventas semanales de un mes en particular, y se considera que la cantidad de envases llevada por los clientes a las canchas de acopio es un porcentaje de esta cantidad. En particular, el análisis de experimentación numérica de esta Sección evalúa tres escenarios en donde este porcentaje toma valores del 60 %, 80 % y 100 %.

10.2.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base

Porcentaje de recuperación de un 60 %

Los resultados cuando se mantiene la restricción que obliga a recuperar cierta cantidad del stock de envases considerando un 60 % de envases recuperados en las canchas de acopio, se presenta en la Sección 10.1.2. Estos resultados son los que se utilizarán como base para realizar la comparación con las soluciones de los modelos de esta Sección. En este último, se maximiza la recuperación de envases por la cancha de acopio. A su vez, el porcentaje de la cantidad de envases que los clientes llevan a las canchas de acopio se mantiene en un 60 %.

En el modelo de la planificación de la producción, los resultados obtenidos disminuyen 814 USD respecto al caso base. Esto representa una disminución menor a un 1 %. Por otro lado, las emisiones ambientales disminuyen en un 17,34 %. Mientras que en el modelo base se emiten 1.584 toneladas de CO₂, en el modelo con la nueva función objetivo asociada a la maximización de recuperación de envases se emiten 1.309 toneladas de CO₂eq. Por último, la cantidad de plástico utilizada en el caso de análisis es de 2.739 unidades, lo que representa una disminución del 12 % respecto al caso base.

En los resultados obtenidos del modelo de la distribución de la producción, los costos disminuyen un 0,17 %, lo que significa un ahorro de 3,5 USD. Por otro lado, en el escenario base, se emiten 5,3 toneladas de CO₂eq, mientras que en el nuevo caso de análisis se emiten 5,2 toneladas de CO₂eq. Es decir, las emisiones disminuyen en un 1,8 %. Si bien los costos y las emisiones ambientales no varían en gran medida, la cantidad de envases recuperados por los camiones en las canchas de acopio aumenta un 17 %. Mientras que en el caso base se recolectan 2.881 envases de las canchas de acopio, los resultados del nuevo escenario en donde se maximiza la recuperación, se recolectan 3.368 unidades.

Porcentaje de recuperación de un 80 %

Este escenario estudia el caso en donde los clientes llevan el 80 % de los envases de los productos que compraron hacia las canchas de acopio. En el modelo de planificación de la producción en donde se maximiza la recuperación de envases en la función objetivo, se obtiene un costo de 201.435 USD. En el modelo base, se obtiene un costo de 202.227 USD, por lo que la disminución de los costos del caso nuevo respecto al base es menor a 1 %. Por otro lado, se obtiene una disminución de emisiones ambientales mayor al 30 %. Mientras que en el modelo base se emiten 895 toneladas de CO₂eq, en la solución del nuevo modelo de maximización de la recuperación se obtiene una emisión de 625 toneladas de CO₂eq. Por último, en este caso de análisis se utilizan 351 unidades menos de envases nuevos en producción respecto al base, lo que equivale a una disminución del 16 %.

Respecto a los resultados obtenidos en el modelo de distribución de la producción el costo varía en una cantidad menor a un 0,20 % por lo que se considera que no tiene grandes diferencias. Las emisiones ambientales aumentan un 2,6 % respecto al caso base. Por otro lado, la cantidad de envases recuperados de los camiones de las canchas de acopio del caso de análisis es de 5.222 unidades. Por otro lado, la cantidad recolectada y llevada a planta en el modelo base es de 3.812 unidades. Es decir, este valor incrementa un 37 % entre el modelo de maximización de la recuperación y el modelo base.

Porcentaje de recuperación de un 100 %

Los costos asociados al modelo de planificación de la producción cuando se maximiza la recuperación de envases de las canchas de acopio a la planta son de 200.267 USD. El costo asociado al caso base, en donde se mantiene una restricción que obliga a recuperar un porcentaje de la demanda es de 200.414 USD. Esto representa un aumento menor a un 1 %. Sin embargo, las emisiones ambientales y la cantidad de plástico utilizada tienen una mayor variación. Las emisiones ambientales disminuyen en 28,5 toneladas de CO₂eq, lo que equivale a un 9,5 % respecto al caso base. Por último, la cantidad de plástico nuevo utilizado en producción disminuye un 4 %. Mientras que en el modelo base se utilizan 1.377 unidades, los resultados del modelo de análisis determina que se necesitan 1.320 unidades.

En el modelo de distribución de la producción, los costos y las emisiones ambientales asociados no tienen mayores diferencias respecto al caso base. Los costos aumentan un 0,30 %, y las emisiones ambientales disminuyen un 3 %. Sin embargo, la cantidad de envases recuperados desde las canchas de acopio a la planta de la empresa en el caso base es de 4.780 envases, mientras que en el caso de análisis

se recolectan 5.587 envases. Esto implica un aumento de más de un 17 % de la cantidad de envases recolectados y disponibles a utilizar en producción.

10.2.3. Comparación global de los escenarios

En términos generales, considerando los modelos de producción y logística, en el caso de maximización de la recuperación de los camiones y el escenario en donde los clientes llevan únicamente un 60 % de los envases de sus compras, el costo es de 205.516 USD. Como se mencionó en la Sección 10.1.3, el costo del caso base para este porcentaje de recuperación es de 206.327 USD. Es decir, la diferencia de los costos entre ambas situaciones difiere en menos de un 1 %.

En el escenario en donde se estima que los clientes devuelvan el 80 % de los envases de sus compras a las canchas de acopio, la diferencia entre los costos de la situación analizada respecto al caso base es de 0,4 %.

Por último, en el escenario en donde el porcentaje de devolución de envases de los clientes a las canchas de acopio es del 100 % de sus compras, la diferencia entre costos es de 142 USD. Esto representa un 0,07 %. Como se puede observar en la Figura 24.

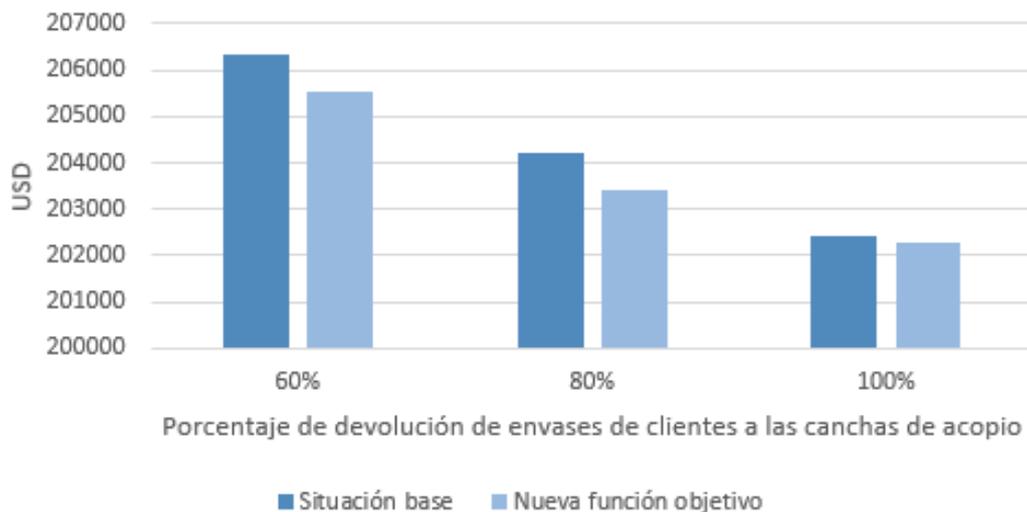


Figura 24: Maximización de recuperación - Análisis del costo.

En cuanto a las emisiones ambientales, se tienen mayores diferencias entre el caso de análisis y el caso base, comparado con el análisis de costos.

En el escenario en donde se recupera únicamente el 60 % de los envases de los clientes en las canchas de acopio, las emisiones del caso base son de 1.589 toneladas de CO₂eq, mientras que las emisiones del caso de análisis son de 1.314 toneladas de CO₂eq. Es decir, las emisiones ambientales disminuyen un 18 % respecto al caso base.

En el escenario en donde se recupera el 80 % de los envases de los clientes, las emisiones del caso de análisis disminuyen 270 toneladas de CO₂eq respecto al caso base, esto representa una disminución del 30 %.

Por último, en caso de que los clientes lleven el 100 % de los envases, las emisiones del caso de análisis son de 276 toneladas de CO₂eq. Sin embargo, las emisiones del caso base son de 305 toneladas de CO₂eq. Es decir, la cantidad de emisiones ambientales en el caso en donde se maximiza la recuperación de envases a la planta disminuye un 9,4 % respecto al caso base.

A continuación, se puede observar la comparación de emisiones del caso de análisis y su caso base correspondiente para cada escenario evaluado.

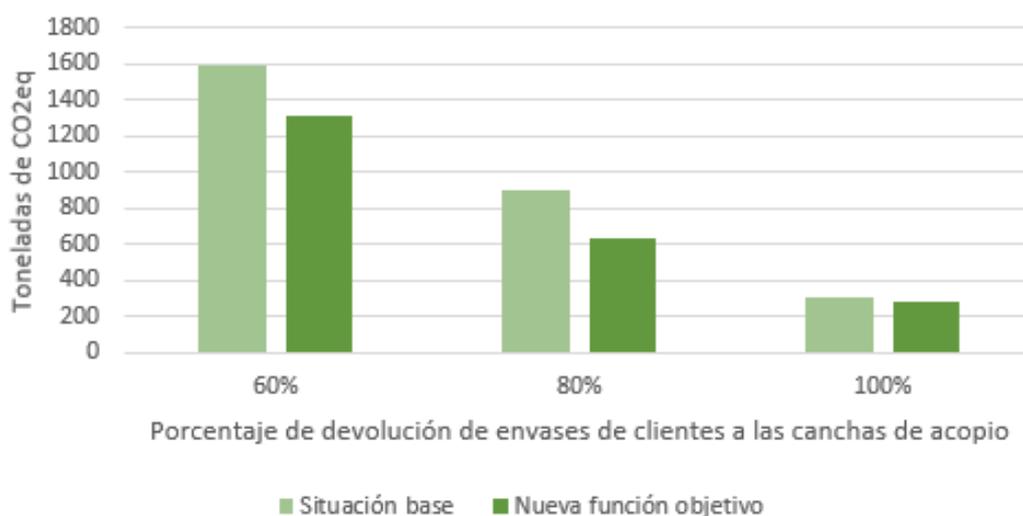


Figura 25: Maximización de recuperación - Análisis de las emisiones ambientales.

La cantidad de plástico utilizada se evalúa únicamente en el modelo de planificación de la producción ya que representa la cantidad de envases nuevos utilizados en producción.

Como se puede observar en la Figura 26, la cantidad de plástico utilizada en el escenario del 60 % es menor respecto al base. Mientras que en el modelo de planificación de la producción del caso base se utilizan 3.102 envases, en la situación analizada se utilizan únicamente 2.739. Esto equivale a una reducción del 11,7 % en el uso de envases nuevos necesarios para producir.

En el escenario en donde se estima que los clientes devuelvan el 80 % de los envases que compran, la cantidad de envases utilizados en el caso base es de 2.171 unidades. Sin embargo, la solución obtenida del modelo de esta experimentación numérica requiere una cantidad de 1.820 de envases para utilizar en producción y satisfacer la demanda pronosticada. Es decir, al maximizar la cantidad de envases recuperados en logística, se tienen mayor cantidad de envases para utilizar en producción, por lo que se necesita un 16 % menos de envases nuevos respecto al caso base.

Por último, en el escenario en donde los clientes devuelven el 100 % de envases a las canchas de acopio, la cantidad de plástico necesaria a utilizar en producción en el caso de análisis es un 4 % menor que el caso base. Mientras que en el caso base se necesitan 1.377 unidades de plástico, el caso de análisis requiere 1.320 unidades.

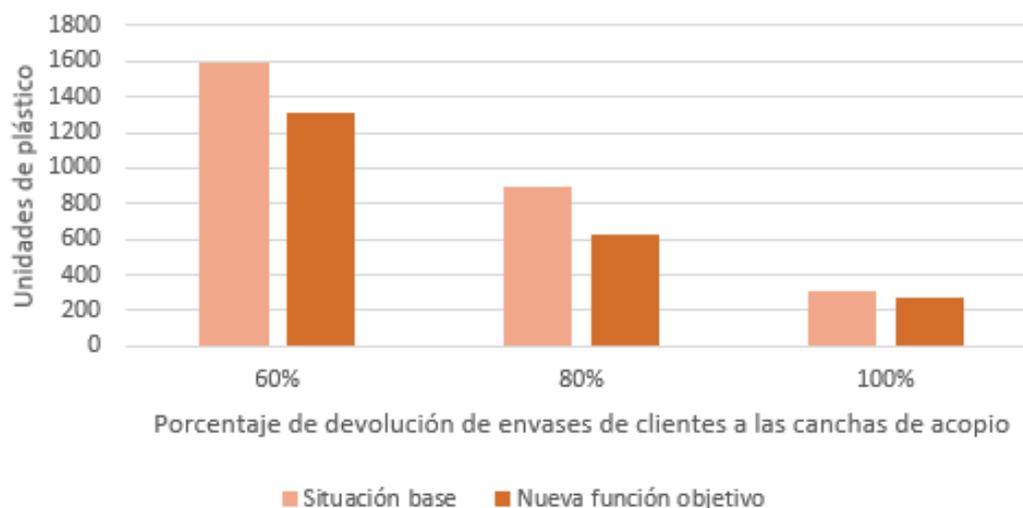


Figura 26: Maximización de recuperación - Análisis de la cantidad de plástico.

Como se puede observar en la Figura 27, la cantidad de envases recuperados en el modelo en donde se maximiza la recuperación en la función objetivo, siempre es mayor respecto a la cantidad de envases recolectados del modelo base. Esto es coherente ya que en uno se tiene una restricción de recolectar al menos cierto porcentaje de los envases de las canchas de acopio, mientras que en el otro se está maximizando la recuperación en la función objetivo.

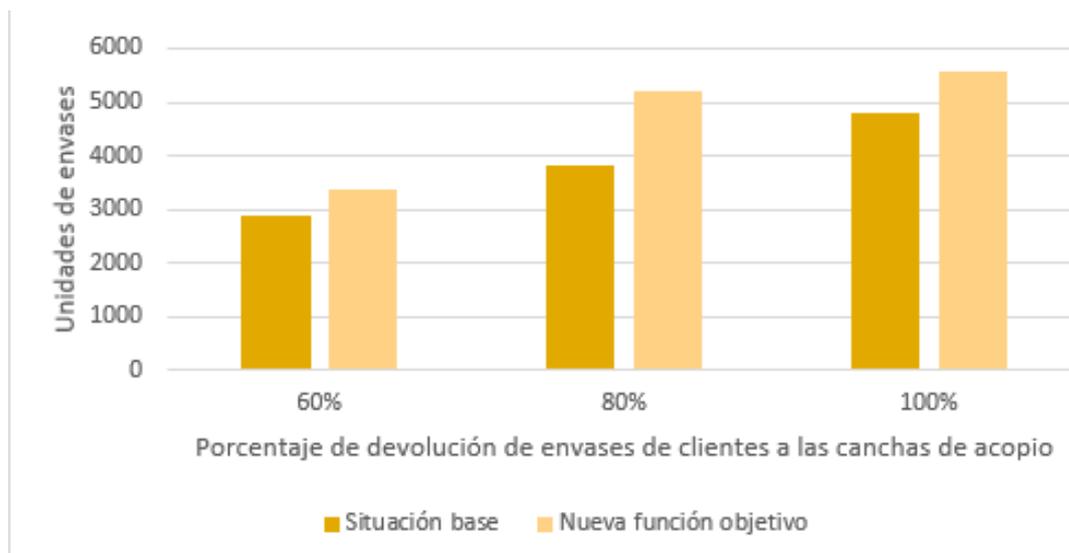


Figura 27: Maximización de recuperación - Análisis de la cantidad de envases recuperados por las canchas de acopio.

Los costos asociados a los modelos de planificación de la producción de los nuevos modelos siempre son menores a la situación base. Esto se debe a que los costos están directamente relacionados con la cantidad de envases nuevos y recuperados que se utilizan en producción. Al tener mayor cantidad de envases para reutilizar, los costos disminuyen. Sin embargo, los costos asociados al modelo de distribución de la producción son más variables ya que depende de la configuración de los viajes de las soluciones. En términos globales, los costos de los nuevos modelos siempre son menores que el caso base.

En términos generales, las emisiones ambientales y la cantidad de plástico nuevo utilizada disminuye en los casos de estudio en comparación con la situación base. La cantidad de emisiones ambientales tiene mayores variaciones en los modelos de planificación de la producción que en los modelos de distribución de la producción. Por lo tanto, era de esperar que las emisiones y la cantidad de plástico disminuyeran respecto al caso base. Al recuperar más envases de las canchas de acopio, se tiene más disponibilidad de envases recuperados para utilizar en producción. Por esta razón, la necesidad de utilizar envases nuevos para producir disminuye, reduciendo las emisiones ambientales.

10.3. Control de calidad realizado en planta

Resulta de interés evaluar los resultados de los modelos para distintos escenarios de envases recuperados disponibles a utilizar en producción. En los casos de análisis de la Sección 10.1, se varía la cantidad de envases disponibles en las canchas de acopio. Este cambio impacta en los modelos de distribución de la producción ya que varía el stock de envases a recuperar en cada cancha de acopio, así como también varía el stock de envases recuperados disponibles a utilizar en producción.

En esta Sección, se plantea variar el porcentaje de productos aprobados por el control de calidad realizado en planta una vez que los camiones entregan los envases recolectados. Es decir, este caso de estudio impacta únicamente al modelo de planificación de la producción.

Se considera importante realizar este caso de análisis ya que el porcentaje de descarte del control de calidad es un dato estimado y no es posible conocerlo con certeza.

10.3.1. Obtención de datos de análisis

La cantidad de envases disponibles a utilizar en producción es calculado como un porcentaje de la cantidad de envases recolectados por los camiones en las canchas de acopio. Este porcentaje hace referencia a la cantidad de envases que no son aprobados por el control de calidad realizado en planta y, por ende, no es posible reutilizarlos.

Inicialmente, cómo se mencionó en la Sección 7.2, se toma la hipótesis de que el porcentaje de descarte es de un 10%. Este análisis de experimentación numérica, evalúa los escenarios en donde el porcentaje de los productos aprobados por el control de calidad toma valores del 70% y el 50%. Los resultados de ambos escenarios se comparan con la solución del modelo en donde la cantidad de envases que aprueba el control de calidad es del 90%. Es decir, este último caso es el que se toma como base.

10.3.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base

Porcentaje de aprobación del 50 % en el control de calidad de planta

En el modelo de planificación de la producción, los resultados obtenidos en el caso en donde el porcentaje de envases aprobados por el control de calidad es del 90 % tienen un costo asociado de 202.227 USD. En este nuevo caso de análisis, en donde se toma la hipótesis de que el 50 % de los envases son descartados, se tiene un costo de 206.239 USD. Esto representa un aumento de un 2 % respecto al caso base. Por otro lado, la cantidad de toneladas de CO₂eq emitidas en el caso nuevo de análisis es de 2.173 toneladas de CO₂eq. Sin embargo, en el caso base se emiten 895 toneladas de CO₂eq, por lo que en el caso de análisis se tiene un aumento de emisiones del 143 % respecto al caso base. Por último, mientras que en el nuevo caso se deben utilizar 3.932 envases nuevos de plástico para realizar la producción, en el caso base se utilizan 2.171 unidades. Es decir, en caso de que se descarte el 50 % de envases en el control de calidad, la cantidad de plástico utilizada aumentaría un 81 %.

En el modelo de distribución de la producción, los costos obtenidos prácticamente no tienen variación respecto al caso base. Evaluando las emisiones ambientales, en caso de disminuir la cantidad de envases aprobados en el control de calidad desde el 90 % al 50 %, las emisiones aumentarían un 0,7 %, por lo que se puede considerar despreciable.

Porcentaje de aprobación del 70 % en el control de calidad de planta

Los costos asociados al modelo de planificación de la producción del caso con un descarte del 30 % son de 204.124 USD, lo que significa un aumento de un 1 % respecto a los costos de la situación base. Las emisiones ambientales y la cantidad de plástico utilizada tiene mayores variaciones. En primer lugar, los resultados de este caso de análisis asociados a las emisiones ambientales aumentan un 69 % respecto al caso base. En segundo lugar, la cantidad de envases de plástico nuevos necesarios para utilizar en producción aumentaría en 837 unidades, lo que equivale un aumento del 39 %.

Al igual que el escenario evaluado anteriormente, los costos del modelo de distribución de la producción no tienen variaciones respecto al caso base. Las emisiones ambientales aumentan un 0,7 %, por lo que también se pueden considerar despreciables.

10.3.3. Comparación global de los escenarios

Evaluando los resultados del modelo de planificación de la producción y el de distribución de la producción, en el caso en donde se descarta únicamente el 10 % de los envases recolectados, el costo es de 204.224 USD. Como se puede observar en la Figura 28, los costos van incrementando a medida que el porcentaje de envases aprobados en el control de calidad va disminuyendo. En el caso en donde se descarta el 30 % de los envases recolectados, el costo es de 206.120 USD, por lo que aumenta cerca de un 1 % respecto al caso base. En caso de que el porcentaje de envases aprobados en el control de calidad sea del 50 %, los costos aumentan aproximadamente un 2 %, tomando valores de 208.236 USD.

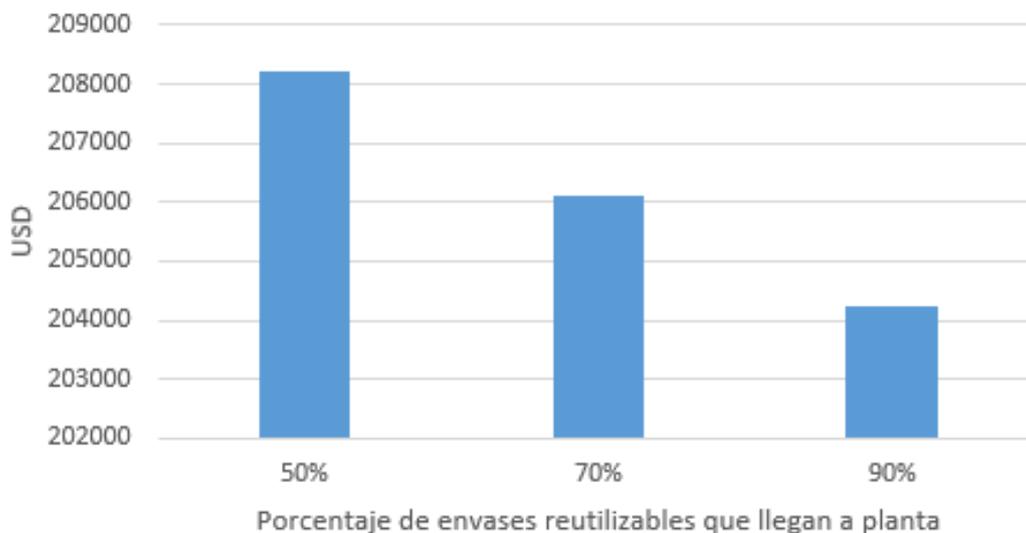


Figura 28: Control de calidad - Análisis del costo.

Evaluando el comportamiento de ambos modelos asociadas a las emisiones ambientales, en el caso de análisis se emiten 900 toneladas de CO₂eq. Por otro lado, las emisiones ambientales en caso de que se aprueben el 70 % de los envases recolectados por los camiones aumentan a 1.519 toneladas de CO₂eq, lo que equivale a un aumento del 69 % respecto al caso base. Como se puede observar en la Figura 29, el escenario en donde se descarta el 50 % de los envases recolectados es donde se tiene la mayor cantidad de emisiones ambientales, tomando un valor de 2.178 toneladas de CO₂eq. Esto representa un aumento del 142 % respecto a las emisiones del caso base.

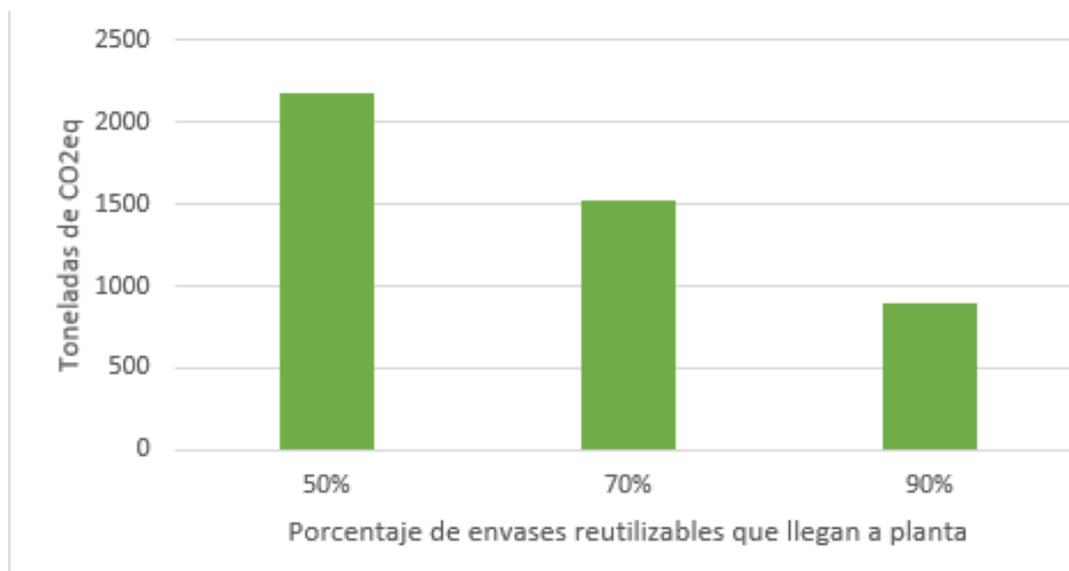


Figura 29: Control de calidad - Análisis de las emisiones ambientales.

La cantidad de plástico utilizada se evalúa únicamente en el modelo de la planificación de la producción. Como es posible observar en la Figura 30, la cantidad de plástico utilizada va aumentando a medida que el porcentaje de aprobación del control de calidad de los envases va disminuyendo. En el caso base en donde el porcentaje de descarte es del 10 %, la cantidad de plástico necesaria para utilizar en producción es de 2.171 unidades. En caso de aumentar este porcentaje al 30 %, la cantidad de plástico utilizada es de 3.008 unidades. Es decir, aumenta un 39 %. Por último, la cantidad de plástico nuevo utilizada en producción para satisfacer la demanda en el escenario en donde se descarta el 50 % aumenta 1.761 envases respecto al caso base. Es decir, es necesario un 82 % más de envases nuevos.

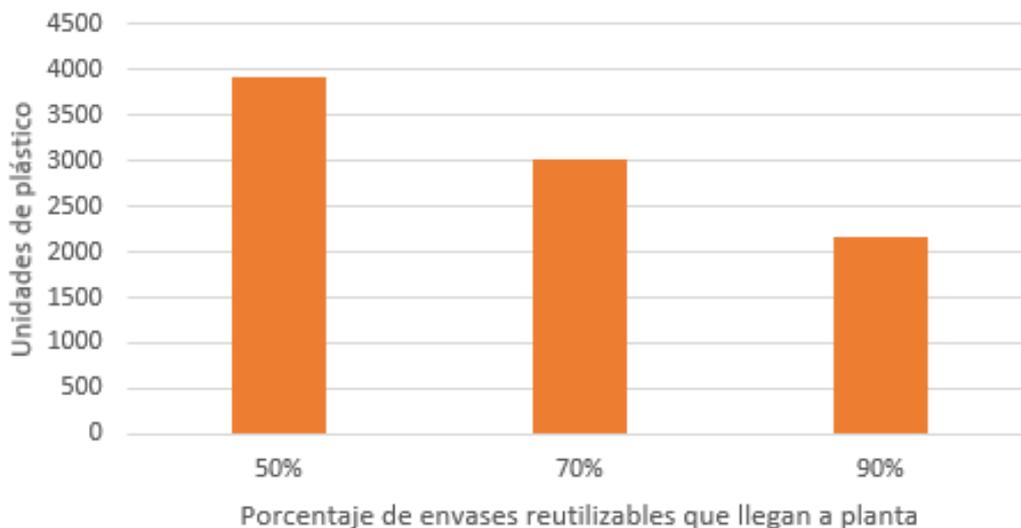


Figura 30: Control de calidad - Análisis de la cantidad de plástico.

Como se puede observar desde la Figura 28 a la 30, los costos, las emisiones ambientales y la cantidad de plástico nuevo utilizado van disminuyendo a medida que el porcentaje de aprobación del control de calidad va aumentando.

A su vez, las diferencias están vinculadas en mayor medida a los resultados del modelo de planificación de la producción. El comportamiento de estos resultados es esperable, ya que el porcentaje de aprobación del control de calidad impacta directamente en el modelo de planificación de la producción. Es decir, a medida que el porcentaje de aprobación del control de calidad en planta va aumentando, se tiene una mayor cantidad de envases disponibles para recuperar, por lo que la necesidad de utilizar envases nuevos va disminuyendo.

Las diferencias de los resultados de los modelos de distribución de la producción son despreciables. Se puede considerar que las diferencias se deben a la configuración de los viajes de la solución.

10.4. Aumento de la demanda

Este análisis consiste en variar la demanda de los productos solicitados por los clientes con el objetivo de estudiar el comportamiento de la solución. Esta variación no afecta la demanda pronosticada del modelo de planificación de la producción. Es decir, la demanda de producción se mantiene igual al caso base. Esto se debe a que, como se mencionó en la Sección 7.2, la demanda de planificación se calcula en base al stock para tres meses hacia adelante, con el objetivo de compensar los meses de alta y de baja demanda. Por esta razón, se espera que la solución óptima del modelo de planificación de la producción no tenga variaciones respecto al caso base. Los resultados del modelo de distribución de la producción sí se verán alterados.

De esta forma, es posible evaluar el comportamiento de la variación de los costos, la variación de las emisiones ambientales y la cantidad de plástico nuevo utilizada.

10.4.1. Obtención de datos de análisis

Como se mencionó en la Sección 7.1, la demanda de cada producto utilizada en la Sección base de análisis (9), es un dato proveniente de la empresa. Este representa la totalidad de la demanda de los clientes de determinado mes. Es decir, para el caso base de análisis se tomó el 100 % de la demanda de un período de la empresa.

En esta Sección, se estudia los escenarios en donde la demanda de los clientes aumenta un 25 % y un 50 %. Para determinar los valores de estas nuevas demandas, se multiplica la demanda base de los clientes por los valores correspondientes de cada escenario.

10.4.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base

Aumento de demanda un 125 %

En el modelo de planificación de la producción, los resultados obtenidos en el escenario en donde la demanda aumenta un 25 % son 1.399 USD menores respecto al caso base, lo que representa un 0,7 %. Por otro lado, las emisiones ambientales y la cantidad de plástico nuevo utilizado disminuye en mayor proporción. Mientras que en el caso base se emiten 895 toneladas de CO₂eq, en el nuevo escenario con una demanda del 125 % se emiten 296 toneladas de CO₂. Esto representa una disminución del 67 % respecto al caso base. Por último, la cantidad de envases nuevos necesarios para utilizar en producción disminuye aproximadamente un 30 %. En el caso base, es necesario utilizar 2.171 unidades de envases nuevos. Sin embargo, en el escenario en donde la demanda aumenta un 25 %, la cantidad de plástico nuevo necesario en producción disminuye a 1.523 unidades.

En el modelo de distribución de la producción, los costos aumentan un 19 %. En la situación base, la solución determina unos costos asociados de 1.997 USD. Sin embargo, la situación de análisis tiene unos costos asociados de 2.374 USD. Por otro lado, las emisiones ambientales aumentan un 1 %. La diferencia de toneladas de CO₂eq entre ambas situaciones es de 0,055.

Aumento de demanda un 150 %

En el escenario en donde la demanda aumenta un 50 %, los costos disminuyen 0,8 % respecto al caso base. A su vez, las emisiones ambientales del caso de estudio son de 274 toneladas de CO₂eq, mientras que en el caso base son de 895. Es decir, si la demanda aumentara un 50 %, se tendría cerca de un 70 % menos de emisiones ambientales. Por último, la cantidad de plástico nuevo utilizada en producción también disminuiría un 35 %. Mientras que en el caso de análisis se utilizan 1.419 unidades de plástico, en el caso base se necesitarían 2.171 unidades.

Respecto al modelo de distribución de la producción, los costos del escenario en donde la demanda aumenta un 50 % son de 2.713 USD, lo que representa un aumento del 36 % respecto al caso base. Los resultados de las emisiones ambientales entre ambos escenarios no tienen grandes diferencias. Al aumentar la demanda, las emisiones aumentan en menos de un 1 %.

10.4.3. Comparación global de los escenarios

En términos generales, considerando los resultados de los modelos de planificación de la producción y distribución de la producción en conjunto, en el caso base se tiene un costo de 204.224 USD. Como se puede observar en la Figura 31, los costos al aumentar la demanda un 25 % disminuyen a 203.203 USD, mientras que los costos globales en el escenario de un aumento de demanda del 50 % son 203.245 USD.

Al aumentar la demanda se obtienen menores costos que el caso base. Esto se debe a que los ahorros en el modelo de planificación de la producción tienen mayor importancia respecto al aumento de costos de los modelos de distribución de la producción. A su vez, los costos del modelo en donde se aumenta la demanda un 25 % son menores respecto al caso en donde se aumenta un 50 %. La razón de este comportamiento es que, si bien el ahorro en los costos del modelo de planificación de la producción son parecidos en ambos escenarios, al aumentar la demanda en un 50 % se tienen mayores costos logísticos asociados a la distribución de la demanda.

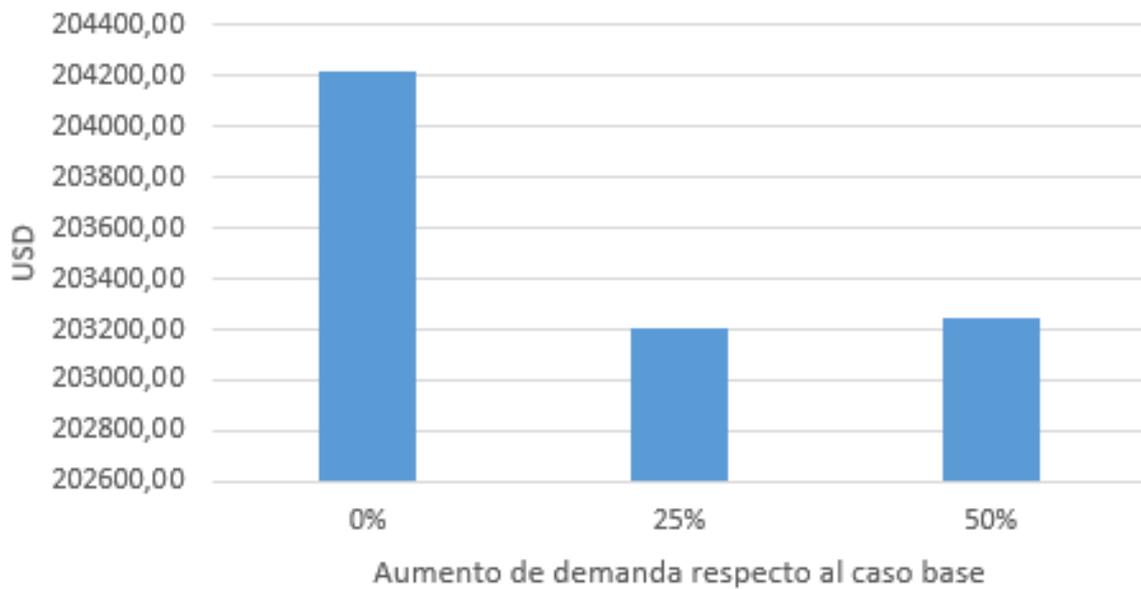


Figura 31: Aumento de demanda - Análisis del costo.

En el caso base se emiten 900 toneladas de CO₂eq considerando los modelos de planificación de la producción y distribución de la producción. Al aumentar la demanda un 25 %, se emiten 301 toneladas de CO₂eq, lo que representa una disminución de emisiones del 67 %. Como se puede observar en la Figura 32, las emisiones de los escenarios en donde la demanda aumenta un 50 % y un 25 % son muy similares. Las emisiones ambientales al aumentar la demanda un 50 %, disminuyen un 69 % respecto al caso base.

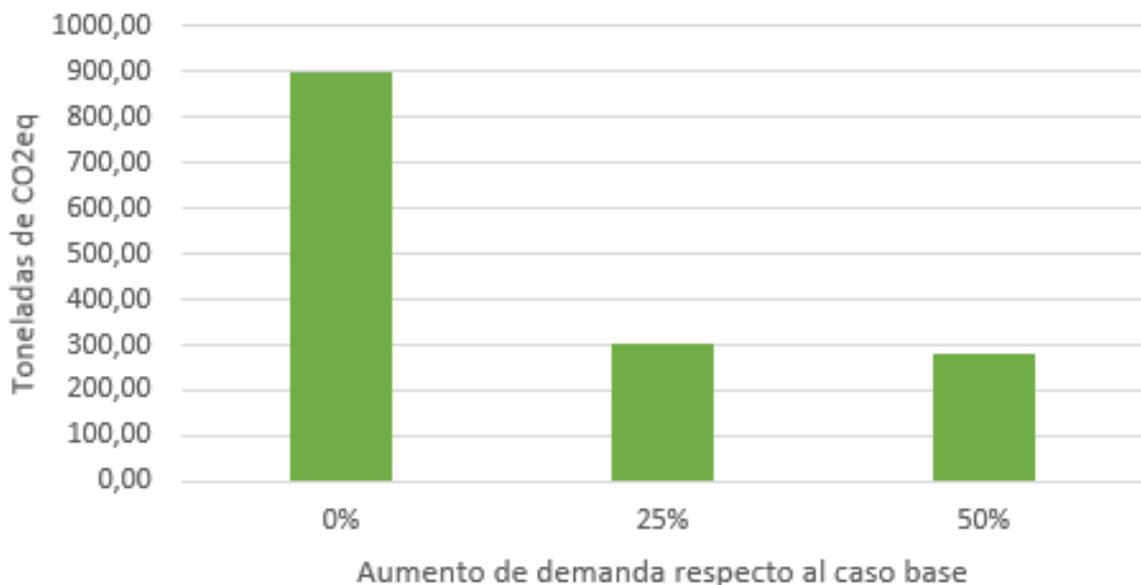


Figura 32: Aumento de demanda - Análisis de las emisiones ambientales.

Al igual que los costos, las variaciones de las emisiones ambientales entre los distintos escenarios son más significativas en los modelos de planificación de la producción que en el de distribución de la producción. Esto se debe a que las emisiones de producir plástico nuevo asociado a los envases nuevos necesarios de utilizar en producción, es mayor que las emisiones de traslado de los camiones.

Como la cantidad de envases recuperados depende directamente de la demanda, al aumentar la demanda, se recuperan más envases. Por lo tanto, la cantidad de envases nuevos necesarios para utilizar en producción disminuye y, por ende, las emisiones ambientales también. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 32, el comportamiento no es inversamente proporcional.

Por último, la cantidad de plástico utilizada se evalúa únicamente en el modelo de planificación de la producción. En el caso base, se necesitan 2.171 unidades de envases nuevos para producir. Al aumentar la demanda un 25 %, la cantidad de envases de plástico nuevos necesarios disminuyen en 648 unidades, lo que representa una disminución del 30 %. Por último, la cantidad de envases nuevos al aumentar la demanda un 50 % es de 1.419 envases, lo que representa una disminución del 35 % respecto al caso base.



Figura 33: Aumento de demanda - Análisis de la cantidad de plástico.

La cantidad de envases nuevos de plástico utilizados en producción depende directamente de la cantidad de envases recolectados en logística. Como se mencionó en la Sección 10.4, la demanda del modelo de planificación de la producción no varía entre escenarios. A su vez, como la cantidad de envases recuperados depende de la cantidad de productos vendidos, al aumentar la demanda de los clientes se recuperan más envases. Este comportamiento se puede observar en la siguiente figura.



Figura 34: Aumento de demanda - Análisis de la cantidad de envases recuperados.

10.5. Incorporación de otro camión propio

Se plantean los modelos incorporando otro camión propio. Como se mencionó en la Sección 7.1, NutAgro cuenta con un camión de seis toneladas de capacidad. En este análisis de experimentación numérica se evalúa la recuperación de envases incorporando otro camión a la empresa. Este será un

camión de igual tamaño que los camiones tercerizados. Es decir, tendrá una capacidad másica de treinta y un toneladas. Sin embargo, los costos de este nuevo camión se determinaron de igual valor que los costos del camión propio ya existente.

Como se menciona en la Sección 6, el camión propio utilizado hoy en día puede alcanzar únicamente los clientes cercanos, y puede realizar más de un viaje por día. El objetivo de evaluar la situación en donde la empresa tenga un camión con más capacidad es modelar que este camión adquirido pueda comportarse como un camión de agencia o tercerizado. Es decir, pueda alcanzar todos los clientes y realizar un único viaje por día.

10.5.1. Obtención de datos de análisis

Para poder modelar la incorporación de otro camión, es necesario realizar algunas modificaciones en el modelo de distribución de la producción. Se agrega un nuevo conjunto de camiones, el cual tiene un único elemento que representa este camión agregado. También es necesario agregar los parámetros de las capacidades volumétricas y másicas de este camión, los cuales se determinaron con el mismo valor que las capacidades de los camiones tercerizados. Por último, se incorporó este nuevo conjunto en la evaluación de los camiones de las restricciones.

10.5.2. Resultados obtenidos y comparación con caso base

En el modelo de planificación de la producción, los resultados obtenidos para los costos, las emisiones ambientales y la cantidad de plástico nuevo utilizado no tiene grandes diferencias respecto al caso base en donde se tiene un único camión pequeño. Las tres diferencias son menores a un 0,1 %.

Sin embargo, en el modelo de distribución de la producción, el costo asociado al nuevo escenario con dos camiones propios de la empresa disminuye un 4 % respecto al costo obtenido en el modelo base. A su vez, la cantidad de emisiones disminuyen en 0,56 toneladas de CO₂, lo que representa aproximadamente un 11 %. Mientras que en el caso base se emiten 5,3 toneladas de CO₂eq, en el nuevo escenario se emiten 5 toneladas de CO₂eq.

En términos globales, los costos asociados al modelo de planificación de la producción y distribución de la producción de este nuevo escenario son de 204.142 USD. Como se puede observar en la Figura 35, los costos del modelo base son de 204.224 USD. Es decir, los costos del nuevo escenario disminuyen un 0,04 % respecto a los costos de la situación en donde existe un único camión, por lo que se puede considerar despreciables.

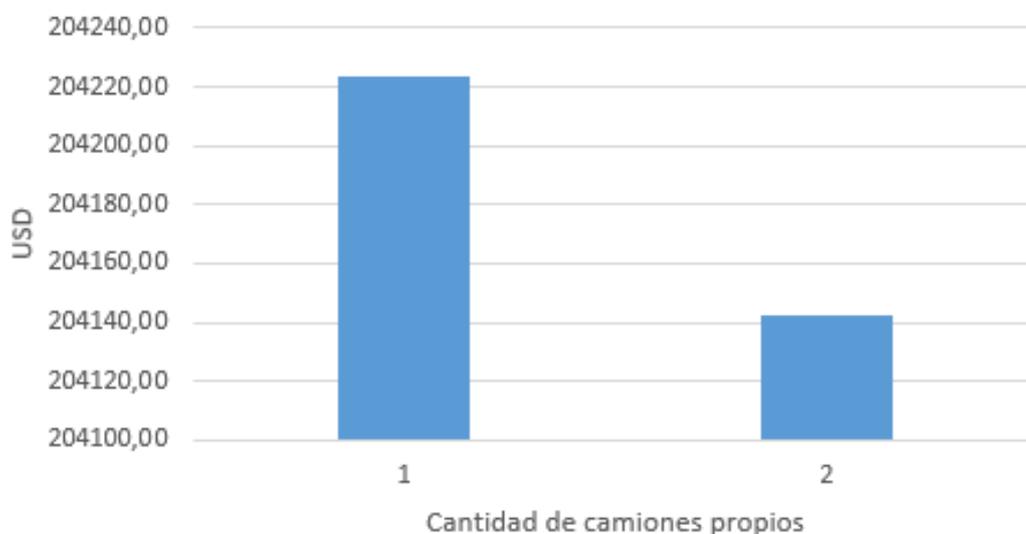


Figura 35: Incorporación de otro camión propio - Análisis del costo.

Como se puede observar en la Figura 36, las emisiones ambientales globales de ambas situaciones son muy similares. Estos resultados son esperables ya que la situación de distribución de productos y recolección de envases es la misma, por lo que las emisiones ambientales no deberían de tener grandes cambios.

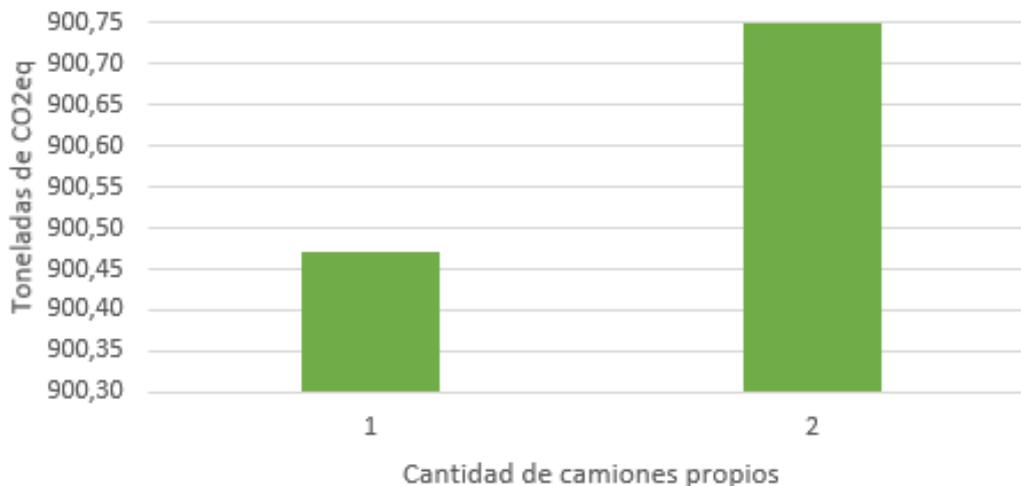


Figura 36: Incorporación de otro camión propio - Análisis de las emisiones ambientales.

Por último, la cantidad de plástico nuevo es evaluado en el modelo de planificación de la producción. Como se puede observar en la siguiente figura, las soluciones de ambos escenarios son muy similares. Esto se debe a que la situación de los datos asociados a la recolección de envases es la misma. Es decir, el stock de envases a recolectar en cada cancha de acopio no varía, así como tampoco el porcentaje de envases aprobados en el control de calidad de la planta. De esta forma, la cantidad de envases nuevos necesarios para utilizar en producción es muy similar.

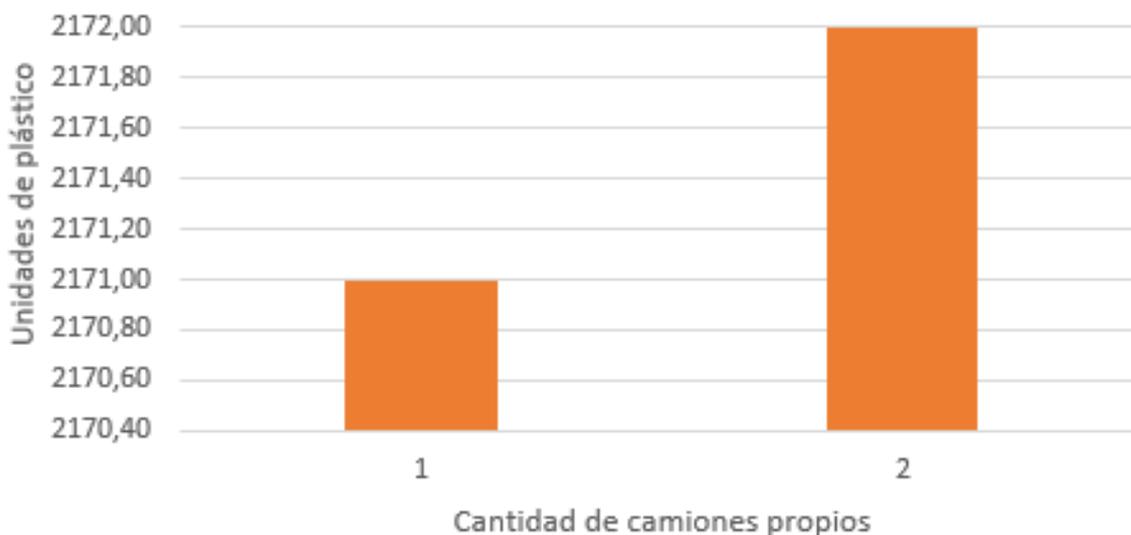


Figura 37: Incorporación de otro camión propio - Análisis de la cantidad de plástico.

A partir de las soluciones obtenidas con los datos de demanda de este mes en particular, no se tienen grandes beneficios en caso de que la empresa cuente con otro camión de mayor tamaño. Es decir, no vale la pena realizar una inversión en este tipo de camión ya que no se tienen beneficios significativos en ninguno de los tres atributos.

Con el objetivo de abarcar distintos casos, se recomienda evaluar esta situación de inversión en otro camión de mayor capacidad con los datos de algún mes en donde la demanda sea mayor.

11. Conclusiones y trabajos futuros

En el presente informe se realizó, en primer lugar, un marco teórico, con el fin de introducir al lector en las temáticas de recuperación, metodologías multicriterio y cadena de suministro con logística inversa. Este marco se basó fuertemente en el estado del arte realizado.

En un contexto mundial que se inclina cada vez más a la sustentabilidad y cuidado del medio ambiente, la recuperación de productos y envases tiene gran incidencia en las buenas prácticas ambientales en el ámbito productivo. Es una temática que ha sido ignorada en tiempos pasados, y que actualmente está teniendo mayor participación en las decisiones empresariales.

Se realizó un estudio de la incidencia del sector agropecuario en la economía uruguaya. Este es uno de los rubros con más actividad del país. Por ende, también es un sector propenso a generar impactos ambientales negativos de descuidarse. En particular, el sector de agroquímicos es reconocido por sus impactos ambientales nocivos, tanto por la incidencia de sus composiciones químicas en la vegetación y cursos de agua, como por la cantidad de plástico que se genera de su empaquetado.

Se estudió la normativa vigente en Uruguay sobre la gestión ambiental de residuos, especialmente en el sector agropecuario. Se pudo observar cómo el país contiene un marco legislativo pautado y favorable para las buenas prácticas de gestión ambiental, incluyendo la remanufacturación y recuperación de envases. En particular, el sector agropecuario contiene un marco legislativo que permite la recuperación de envases. Existe un abanico de opciones para solucionar el problema de gestión de envases plásticos.

En este proyecto se planteó un caso de estudio específico sobre la recuperación de envases en una planta de producción y distribución de productos de nutrición animal y vegetal. Se realizó un relevamiento de sus procesos actuales, con el foco en la viabilidad de la incorporación de procesos de recuperación de envases. En base a este relevamiento se realizaron modelos matemáticos para la producción y logística actual de la empresa, sin opciones de retorno, buscando minimizar costos. Se procedió a validar los modelos para corroborar el correcto modelado de la realidad actual.

Luego, se planteó un diseño de logística inversa contemplando la recuperación de envases en la empresa. Dichos cambios en los procesos se plasmaron en modelos matemáticos de planificación y distribución de la producción con opciones de retorno. Además de buscar la minimización de costos, se buscó la minimización de gases de efecto invernadero y la generación de plástico. Estos modelos también fueron sometidos a un procedimiento de validación. Dada la característica multiobjetivo de los modelos con opciones de recuperación, se plantearon los mismos con el enfoque de programación por metas, permitiendo así su resolución.

Todos los modelos fueron ejecutados en base a datos proporcionados por la empresa y datos estimados para un mes en particular. Su resolución se llevó a cabo con el software de optimización Gurobi. El enfoque multicriterio de los problemas permitió una perspectiva y solución integral que no se podría abarcar con modelos clásicos de un solo objetivo. Se estudió la factibilidad de recuperación de envases con foco económico pero también ambiental.

De los resultados del caso base y la comparación entre las opciones con y sin retorno, se pudo observar cómo la recuperación de envases es factible. Desde la perspectiva económica, la reutilización de envases permite minimizar costos de producción, ya que los envases nuevos tienen un costo asociado que no es menor. A su vez, la reutilización disminuye los impactos ambientales en gran medida, especialmente aquellos asociados a la fabricación y disposición del plástico.

La recuperación de envases por canchas de acopio aumenta los viajes en la logística de la empresa al añadir viajes de retorno. Sin embargo, el estudio de factibilidad de la recuperación puso el foco en minimizar las emisiones al ambiente. Teniendo este objetivo presente, la solución brindada para distribuir los productos es distinta a la opción sin retornos, haciéndola más eficiente ambientalmente.

También se estudiaron distintos casos de experimentación numérica de los parámetros planteados inicialmente. Se atacaron distintos puntos y datos en los modelos que están sujetos a incertidumbre, ya que no se encuentran en la realidad actual de la empresa. Se hizo una comparación de estas variantes con el caso base, donde se observó cómo algunas acciones inciden de gran manera en la variación de objetivos. En particular, el porcentaje de envases que los clientes devuelven y la calidad de dichos envases son puntos a tener especial consideración de llevar a cabo la recuperación de envases.

Los resultados obtenidos muestran que la recuperación de envases es un camino para seguir ahondando, especialmente si se quiere tener una cultura ambiental en la empresa. El hecho de que no haya mayores inversiones, y sí haya una minoría sustancial en emisiones ambientales en la solución, hace que este planteo pueda ser una vía de acercamiento a certificaciones de gestión ambiental o de huella de carbono. En particular, el estudio de huella de carbono de producto considera las emisiones de producción y disposición del mismo.

Para seguir ahondando en el planteo de la recuperación de envases, se recomienda realizar un estudio de mercado sobre el comportamiento de los clientes frente a la posibilidad de devolver envases. También se debe estudiar el acondicionamiento de los centros de acopio para recibir envases. Si bien los centros de acopio están obligados por ley a recibir envases, se deben acondicionar para tener una logística eficiente y evitar sobre costos. También se recomienda analizar la disponibilidad de camiones para el retorno de envases, así como la reestructura de las operaciones e infraestructura en planta para recibir y

reacondicionar envases.

Para poner la recuperación en práctica, se puede estimular la devolución de envases con campañas de marketing y concientización ambiental. También se pueden plantear incentivos monetarios, como el descuento del precio del envase, o promociones en futuras compras por devolver envases.

Como posibles trabajos a futuro sobre este proyecto, se propone, en primer lugar, incorporar la automatización de la alimentación entre modelos. Con ello se busca ahorrar tiempo en la preparación de los datos para la secuencia de resoluciones. Las condiciones iniciales no requerirían de operaciones manuales, bajando a su vez, la probabilidad de error en el cálculo de éstas en cada modelo. Para ello, se deberían definir determinados parámetros dentro de los modelos, como lo son el porcentaje de recuperación de envases de los clientes a las canchas de acopio, o el porcentaje de envases con calidad aceptable recibidos en la planta. Estos actualmente se consideran externamente en el tratamientos de datos.

Por otro lado, resultaría interesante añadir incertidumbre en los modelos, en particular, en lo que significa la recuperación de envases. Dado que el proyecto asume una situación hipotética, agregar este factor brindaría una perspectiva del problema más completa. Esto implicaría reformular los modelos y posiblemente mayores tiempos de resolución.

Siguiendo con la metodología de resolución del problema, en este proyecto se escogió el método de programación por metas ponderadas, con ponderación igual a uno en cada variable de desviación. Sin embargo, se podría pensar en variar dichos pesos entre las variables mencionadas, según los intereses que primen en el centro decisor.

También podría plantearse reformular a los modelos utilizando otros enfoques dentro de la programación por metas. Un posible caso es el método lexicográfico para distinguir los intereses del tomador de decisiones en niveles, y por tanto, resolver el problema según la secuencia de prioridades.

El enfoque de programación por metas con metas ponderadas busca la minimización global de las variables de desviación, aunque esto signifique desviaciones muy dispares a las distintas metas. Otra alternativa posible es plantearlo como un modelo de programación por metas con el método Minmax. En ese caso, el centro decisor obtendrá una solución que contempla un balance en el alcance de todas las metas.

En esta misma línea, también podrían incorporarse nuevos objetivos, según las necesidades de las partes interesadas. Un caso concreto es la incorporación de la maximización de la recuperación de envases en el modelo de distribución, como se vio en la experimentación numérica.

También se podría incluir ruteo en el modelo de distribución de la producción y recuperación de envases. Un planteo de ruteo multiproducto, multivisita y con capacidad finita de los camiones, brindaría otra perspectiva al problema. Esta modificación se traduciría a resultados de costos y emisiones más precisos, aunque es un tipo de modelado más complejo y que demanda mayores tiempos de resolución.

Por último, un estudio de interés sería resolver los modelos durante una secuencia que represente un mayor período de tiempo, como por ejemplo, un año. De esta manera, se podrían apreciar con mayor detalle las distintas zafas de ventas y, consecuentemente, el comportamiento de los envases disponibles para su recuperación. De esta forma se podría evaluar el problema con mayor perspectiva. Para ello se debería obtener una mayor cantidad de datos, y mayor cantidad de resoluciones.

Referencias

- [1] T. Astrup, T. Fruergaard, and T. H. Christensen. Recycling of plastic: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(8):763 – 772, 2009.
- [2] C. Bai, H. Ahmadi, M. Moktadir, S. Kusi-Sarpong, and J. Liou. Analyzing the interactions among the challenges to circular economy practices. *IEEE Access*, 9:63199 – 63212, 2021.
- [3] B. Beamon. Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12:332–342, 1999.
- [4] J. Branke, K. Deb, K. Miettinen, and S. Roman. *Multiobjective optimization: Interactive and evolutionary approaches*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [5] C. Davies, J. Harnisch, O. Lucon, S. McKibbin, S. Saile, F. Wagner, and M. Walsh. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html/>, 2006. (accessed: 08.24.2022).
- [6] S. Ellspermann, G. Evans, and M. Basadur. The impact of training on the formulation of ill-structured problems. *The International Journal of Management Science*, 35:221–236, 2005.
- [7] Á. S. Fernández Bou and J. C. Soares de Mello. Análisis del método ordinal de decisión multicriterio del veto. *INGENIARE - Revista Chilena de Ingeniería*, 23:556 – 568, 2015.
- [8] A. Garcia. Recomendaciones tactico-operativas para implementar un programa de logística inversa: Estudio de caso en la industria de reciclaje. https://www.academia.edu/8845106/Recomendaciones_t%C3%A1ctico_operativas_para_implementar_un_programa_de_log%C3%ADstica_Inversa, 2006. (accessed: 08.24.2022).
- [9] A. Gupta and G.W. Evans. A goal programming model for the operation of closed-loop supply chains. *Engineering Optimization*, 48:713–735, 2009.
- [10] D. Jones, M. Tamiz, et al. *Practical goal programming*. 2010.
- [11] A. Kumar, B. Sah, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R.C. Bansal. A review of multi criteria decision making (mcdm) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:596–609, 2017.
- [12] L. Meade, J. Sarkis, and A. Presley. The theory and practice of reverse logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 3:56–84, 2007.
- [13] J. Mujica, F. Beltrame, F. Lorenzo, N. Loustaunau, S. Muñoz, and T. Aguerre. Decreto n° 152/013 reglamentación del ley 17.283 (ley general de protección del medio ambiente). 2013.
- [14] O. Ondemir and S. Gupta. Quality management in product recovery using the internet of things: An optimization approach. *Computers in Industry*, 65:491–504, 2013.
- [15] S.D. Pohekar and M. Ramachandran. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 8(4):365, 2004.
- [16] D. Rogers and R. Tibben-Lembke. Going backwards: Reverse logistics trends and practices. *Reverse Logistics Executive Council*, 12:332–342, 1998.
- [17] C. Romero. *Análisis de las Decisiones Multicriterio*. Isdefe, 1996.
- [18] J. C. San Cristóbal. *Multi criteria analysis in the renewable energy industry*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [19] Y. Sánchez, J. Pérez, N. Sangroni, C. Cruz, and Y. Medina. Retos actuales de la logística y la cadena de suministro. *Ingeniería Industrial*, 42:169 – 184, 2021.
- [20] H. Verfaillie and R. Bidwell. Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance. *World Business Council for Sustainable Development*, 2000.
- [21] T. Vázquez, E. Bonomi, R. Nin Novoa, D. Astori, M.J. Muñoz, V. Rossi, G. Monecchi, E. Murro, J. Basso, A. Castelar, L. Kechichian, E. de León, and M. Arismendi. Ley n° 19829 aprobación de normas para la gestión integral de residuos. 2019.
- [22] J. Wallenius, J. S. Dyer, P. C. Fishburn, R. E. Steuer, S. Zionts, and K. Deb. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead. *Management Science*, 54:1336–1349, 2008.
- [23] F. Wang, X. Lai, and N. Shi. A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51:262–269, 2011.

- [24] J. Wang, C. Cheng, and H. Kun-Cheng. Fuzzy hierarchical topsis for supplier selection. *Applied Soft Computing*, 9:377–386, 2008.
- [25] A. Xanthopoulos and E. Iakovou. On the optimal design of the disassembly and recovery processes. *Waste management*, 29:1702–1711, 2008.
- [26] Uruguay XXI. Informe sectorial, agronegocios. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/en/information-center/article/agribusiness/>, 2020. (accessed: 08.24.2022).
- [27] A. Yayla, A. Oztekin, A. Gumus, and A. Gunasekaran. A hybrid data analytic methodology for 3pl transportation provider evaluation using fuzzy multi-criteria decision making. *International Journal of Production Research*, 53:6097–6113, 2015.
- [28] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.

Anexo 1: Estado del Arte



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



PROYECTO DE GRADO - INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN

Programación por metas y otras metodologías multicriterio aplicadas a la remanufacturación y logística inversa

Estado del Arte

Autores:

Elena María GUGGERI
Carolina HAM
Pilar SILVEYRA

Tutores:

Pedro PIÑEYRO
Daniel ROSSIT

26 de setiembre de 2021

Glosario

- **Ecoeficiencia:** Proporcionar bienes y servicios a un precio competitivo, satisfaciendo las necesidades del cliente, al tiempo que se reduce el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida.
- **Cadena de suministro de circuito cerrado:** Considera la continua reincorporación de los materiales, productos y empaques una y otra vez en el proceso productivo.
- **EOLs:** “End of life products” de sus siglas en inglés. Refiere a productos al final de su vida útil.
- **ARTODTO:** “Advanced remanufacture to order- disassembly to order” de sus siglas en inglés. Refiere a una metodología avanzada de desmontaje y remanufactura contrapedido.
- **ELVs:** “End of life Vehicles”. Concepto análogo a EOLs, pero únicamente aplicado a vehículos.
- **IoT:** “Internet of Things” de sus siglas en inglés. Hace referencia a productos cotidianos embebidos con dispositivos informáticos, los cuales permiten el intercambio de datos via internet.
- **AHP:** “Analytic Hierarchy Process”. Procedimiento multicriterio comunmente utilizado para la selección de alternativas, teniendo en cuenta la comparación de distintos criterios.
- **WEEE:** “Waste from Electrical and Electronic Equipment” de sus siglas en inglés. Refiere a los residuos eléctricos y de equipamientos de electrónica.
- **RFID:** “Radiofrequency Identification”. Sistema de almacenamiento y recuperación de datos que utiliza como insumo las ondas de radio para guardar y transmitir la identidad de un artículo etiquetado con dicha tecnología.

1. Introducción

Las cadenas de suministro tradicionales manifiestan el interés de incorporar actividades que minimicen el impacto ambiental debido al creciente deterioro del medio ambiente en los últimos años [6]. Esto conlleva a la incorporación del concepto de ecoeficiencia en las empresas, lo cual implica la producción a precios competitivos mientras que simultáneamente desciende los impactos ecológicos de las actividades productivas [62]. Los procesos de fabricación se consideran los responsables primordiales del deterioro ambiental. Sin embargo, actualmente no es aceptable analizar únicamente los efectos locales e inmediatos de los procesos productivos, sino que también es necesario considerar los efectos del ciclo de vida de los productos completamente [6]. Así es como ha comenzado a surgir la tendencia de extender la cadena de suministro avanzada a un ciclo cerrado para integrar el flujo de mercancías de devolución al final de su vida útil, con sus siglas en inglés EOL - *end of life* -.

La logística inversa se puede definir como el “proceso de planificación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de materia prima, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el propósito de recuperar el valor o eliminarlo adecuadamente-[50]. Las decisiones asociadas con este término generalmente implican compensaciones entre diferentes objetivos en conflicto [64]. Los métodos multicriterio para la toma de decisiones (MCDM, de sus siglas en inglés) usualmente son enfoques utilizados cuando los problemas de decisiones tienen objetivos múltiples y contradictorios, ya que fomentan a estructurar la información y evaluar las decisiones [68]. MCDM puede permitir a los involucrados comprender y utilizar los resultados, facilitando el proceso de la obtención de recomendaciones sobre los objetivos [65].

El objetivo de este documento consiste en realizar un relevamiento de la literatura sobre las decisiones multicriterio en logística inversa de los productos usados. Se plantea una revisión sistemática de la literatura, en donde se desarrolla un abordaje conceptual de la temática, sus características y las aplicaciones de investigación en los últimos años.

El resto del documento se encuentra organizado del siguiente modo. En la Sección marco, se ahonda en la descripción detallada de la temática de logística inversa, así como también se presenta un marco conceptual sobre la toma de decisiones multicriterio y se profundiza en el método de resolución de programación por metas. En la Sección rev, se detalla la metodología de la búsqueda sistemática de la literatura y se presenta un análisis de los documentos en la Sección anal. Por último, en la Sección Conclusiones se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos.

2. Marco teórico

A continuación, se profundiza en la temática de la cadena de suministro cerrado enfocado en logística inversa, con el objetivo de informar conceptualmente al lector para que pueda comprender y aprovechar el contenido abordado en la búsqueda sistemática de la literatura. A su vez, se ahonda en el método multicriterio para la toma de decisiones, analizando específicamente el método de programación por metas.

2.1. Cadena de suministro

Debido a la tendencia creciente en el deterioro del medio ambiente, investigadores y profesionales han desarrollado mayor interés en su cuidado, estudiando e incluyendo actividades que minimicen el impacto ambiental [6]. Hay distintas razones por las cuales se ha aumentado el interés por la incorporación del flujo inverso, dentro de las cuales se encuentran tres principales [41]. En primer lugar, los fabricantes pueden generar una fuente más económica de materias primas y repuestos. A su vez, las regulaciones gubernamentales son otro factor importante ya que algunos países impulsaron legislaciones de devolución a las empresas. Por último, la perspectiva de los clientes sobre las cuestiones ambientales ha impulsado a que la utilización de los productos recuperados se comience a considerar en las políticas de las empresas para mejorar la satisfacción de sus clientes.

Sin embargo, también se considera que la logística inversa no surge como resultado de costos empresariales o la aprobación de leyes, sino que el objetivo principal de la logística inversa implica considerar la eficiencia y rentabilidad de los productos EOL para fomentar el desarrollo sostenible de los productos, mientras que se cumple la normativa [66]. Es decir, la buena voluntad de elaborar productos mediante procedimientos socialmente responsables puede producir beneficios económicos para las empresas, pero también proteger al medio ambiente de diversos elementos peligrosos. Esto da lugar a lo que se conoce como economía circular, en donde comienza a considerarse la existencia de los productos luego de satisfacer las necesidades del cliente final. De esta forma, las empresas comienzan a abandonar el concepto de “fin de vida útil” del producto, e incorporan la reutilización y reciclaje de los elementos en el proceso de producción, con el objetivo de mejorar las calidades medioambientales, sociales y económicas [3].

El modelo general de la logística inversa puede contener distintas fases, tal como se puede observar en la Fig. Figura:1, dentro de las cuales se encuentran [17] :

- Fase de recolección: En donde se lleva a cabo la colecta de los retornos. Esta compleja etapa abarca la planificación de las rutas, los tiempos de recolección, entre otros.
- Fase de clasificación: En esta etapa se decide el tratamiento a realizar en las devoluciones. Los retornos pueden ser reparados, reciclados, reprocesados, reutilizados, rechazados o eliminados. Es importante destacar que la reutilización puede ser la totalidad de la devolución o únicamente algunas partes.
- Fase de colocación: Una vez que los retornos son recolectados y clasificados, se debe tomar la decisión de qué hacer y cómo involucrarlos en el mercado nuevamente. Esto podría ser a través de venderlo nuevamente al cliente, venderlo en mercados secundarios a precios más bajos, donarlos o disponerlos a vertederos.
- Fase de medición y control: Esta etapa busca evaluar la eficacia de los objetivos y controlar la eficacia del proceso de logística inversa. De esta forma, permite generar una realimentación al diseño del proceso en caso de que sea necesario, con el objetivo de optimizar las ganancias.

Es importante mencionar que en la literatura es posible encontrar diferentes nomenclaturas para la secuencia de pasos de la logística inversa. Sin embargo, usualmente el contenido de las terminologías se puede correlacionar fácilmente.

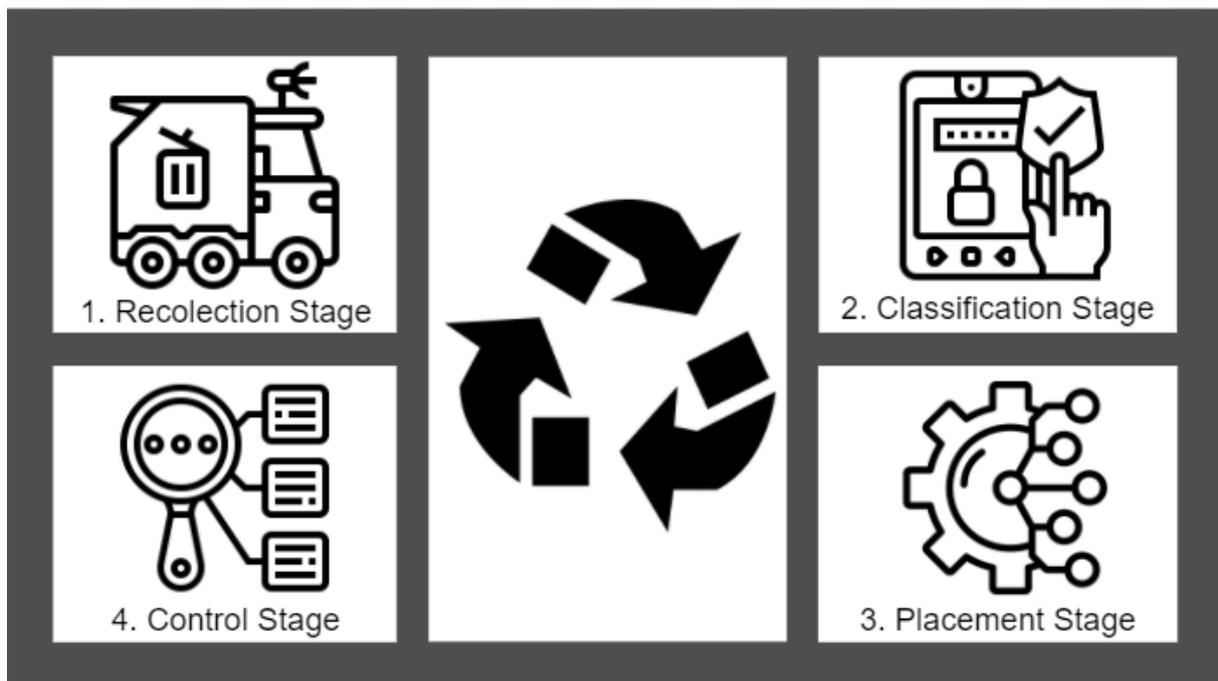


Figura 1: Fases de la logística inversa. Fuente: Elaboración propia.

Una cadena de suministro abarca todas las actividades necesarias para llevar a cabo un producto, desde la etapa de extracción de materia prima hasta el uso y satisfacción por parte del cliente [58]. El proceso de toma de decisiones en logística inversa se considera más engorroso comparado con la cadena de suministro hacia adelante debido a que usualmente consisten en problemas mal estructurados [20]. Por definición, un problema mal estructurado es aquel en donde “las soluciones alternativas posibles, los objetivos asociados con la solución de los problemas, los tomadores de decisión y las partes interesadas relevantes no son evidentes” [20]. A su vez, “los datos necesarios para modelar el problema no suelen estar fácilmente disponibles” [14]. Los problemas de logística inversa generalmente contienen la incertidumbre de la cantidad y calidad de los productos devueltos, lo que conlleva a que las operaciones de recuperación se vuelvan impredecibles [45]. Por otro lado, la falta de un sistema definido para incorporar los productos utilizados desde los clientes a la cadena de suministro ocasiona que no sea un procedimiento sencillo para los fabricantes [20].

A su vez, pueden existir otros desafíos en el desarrollo de cadena de suministro de circuito cerrado. En primer lugar, los fabricantes podrían acortar los ciclos de vida de los productos, de forma de poder recuperar un mayor valor en las devoluciones. En segundo lugar, las empresas que desean incorporar la remanufactura a su cadena de suministro avanzada, deben reestudiar sus decisiones sobre la asignación de recursos, entre ellos, el transporte, la maquinaria, mano de obra y espacios de almacenamiento. Los recursos utilizados pueden ser disponibles internamente, recursos externos, o combinación de ambos [20]. Usualmente, se prefiere subcontratar la red de recuperación a proveedores de logística inversa, con el argumento de ahorrar costos y poder concentrarse en otros procesos comerciales de la empresa. Sin embargo, la selección de un proveedor externo debe ser muy cautelosa, ya que debe funcionar como un socio confiable y rentable a la cadena de suministro [19].

Los problemas de decisión en la gestión de la cadena de suministro que tienen un impacto en la ecoeficiencia se pueden clasificar en tres categorías [4]: planificación de la producción, planificación de la distribución y administración de inventario. La planificación de la producción está asociada con la toma de decisión de la organización de la producción, cuánto producir, cuándo realizarlo y la secuencia de operaciones. La planificación de la distribución se refiere tanto a las decisiones de transporte (modo de transporte, tipo y tamaño, ruta de vehículos) como a la selección de instalaciones, donde se considera los costos operativos totales y el uso de la energía de la planta. La última clasificación hace referencia a las decisiones asociadas a la gestión de inventario y la forma en que es controlado. Si bien existen estas tres categorías, en la literatura se puede encontrar otros problemas de decisión asociados a la selección de proveedores, planificación de insumos de producción, determinación de precios de los productos, o combinaciones de los distintos problemas de decisión ya mencionados.

2.2. Conceptos de toma de decisiones multicriterio

Tomar decisiones correctas es la base de una buena planificación estratégica [15]. De todas formas, esta puede ser una tarea difícil [8], sobre todo cuando las decisiones deben ser tomadas en grupo [15]. Si se quiere elegir un método cualquiera para dicha toma de decisiones, la estructura de este se compone de la siguiente serie de etapas [15]:

1. Identificación de los tomadores de decisión.
2. Definición de las alternativas a ser votadas.
3. Definición de los criterios relevantes.
4. Análisis de las alternativas en función de los criterios.
5. Determinación de la relevancia de cada criterio.
6. Ranking de las alternativas por los tomadores de decisión.
7. Análisis de sensibilidad.
8. Recomendaciones.
9. Implementación de las acciones decididas.

Por otro lado, Forman y Peniwati en [16] distinguen dos procedimientos para la toma de decisiones. Uno sería la agregación de juicios individuales donde el grupo decide como una unidad; mientras que por otro lado, el segundo sería la agregación de prioridades individuales, en donde cada individuo del grupo defiende su propia postura.

Ahora bien, a modo de considerar que un método sea justo y no presente paradojas, Fernández Bou y Soares de Mello en [15] presentan cinco axiomas que sistematizan dichas condiciones:

- **Independencia de las alternativas irrelevantes:** dado un par de alternativas x e y dentro de un conjunto mayor de alternativas posibles, la preferencia por x o por y debe depender únicamente de cómo los tomadores de decisión ordenan x respecto de y , y no de cómo ordenan las otras alternativas del conjunto.
- **Transitividad:** si A es preferible a B , y B es preferible a C , entonces A debe ser preferible a C .
- **Universalidad:** el método debe funcionar respetando todos los axiomas para cualquier conjunto de decisiones de los tomadores de decisión.

- **Unanimidad de Pareto:** si existen dos alternativas para las que todos los tomadores de decisión prefieran la primera a la segunda, la primera debe quedar posicionada por encima de la otra en la ordenación final.
- **Orden total:** dado un par de alternativas x e y dentro de un conjunto mayor de alternativas posibles, x tiene que ser mejor, peor o igual que y .

Sin embargo, fue posteriormente demostrado que no existe la posibilidad de crear un método que cumpla con los cinco axiomas [15]. Esto implica, por tanto, que esta limitación introduce subjetividad [15]. El motivo de esto es que la estructura de 9 etapas definida con anterioridad representa a los métodos ordinales, los cuales son considerados intuitivos [15]. Por ende, en cada caso se seleccionará un método ordinal acorde a las características de este.

Siguiendo ahora con la historia del Apoyo a las Decisiones Multicriterio, o Análisis de las Decisiones Multicriterio, según Fernández Bou y Soares de Mello en [15] fue constituido formalmente como una rama de la Investigación Operativa durante los años setenta. Koksalan, et al. en [35] agrega que el análisis de decisiones multicriterio se origina, básicamente, de la rama de Investigación de Operaciones, incluyendo un amplio rango de distintas metodologías y apoyo de varias otras disciplinas.

Muchos problemas de decisión y planificación involucran múltiples objetivos en conflicto que deben considerarse simultáneamente [7]. Estos problemas se conocen como problemas de toma de decisiones multicriterio [7]. Según Pohekar y Tibben-Lembke en [48], MCDM refiere a una clase general de modelos de investigación de operaciones, que tiene como objetivo cuantificar alternativas factibles y ayudar a los tomadores de decisiones a seleccionar (un subconjunto de) opciones o alternativas basadas en dos o más criterios [63]. MCDM ayuda a un tomador de decisiones que cuantifica criterios según su importancia, en presencia de varios objetivos [36].

Los problemas de MCDM generalmente consisten de 5 componentes: objetivo, preferencias del tomador de decisiones, alternativas, criterios y resultados [40]. La Fig. Figura:ele1 ilustra un procedimiento general de la técnica MCDM [36].

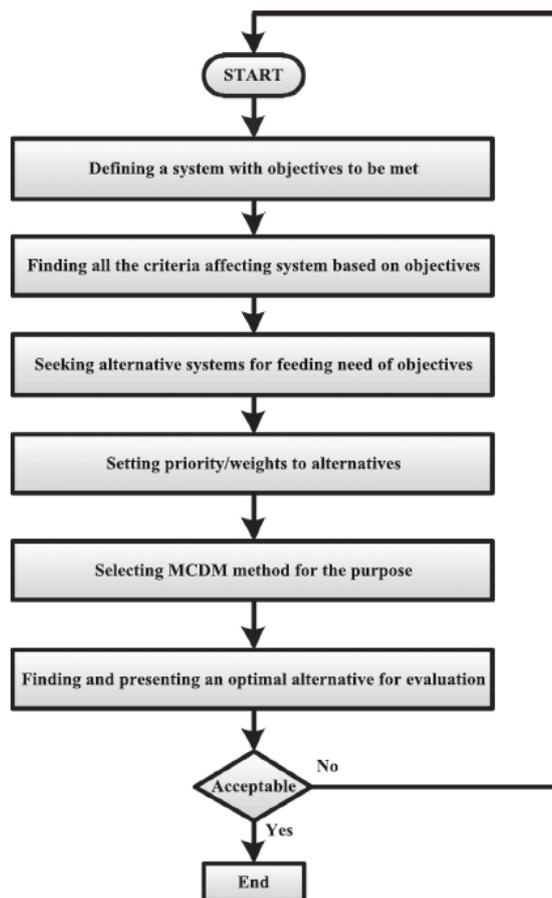


Figura 2: Procedimiento estándar de análisis MCDM. Fuente: [36]

Según Tsoutsos et al. [59], MCDM se considera una evaluación estructurada para resolver problemas ambientales, socioeconómicos, técnicos y barreras institucionales involucradas en la planificación energética. Asimismo, de Banasik et al. [5] se desprende que los tomadores de decisiones en las cadenas de abastecimiento verdes (GSC, de sus siglas en inglés “Green Supply Chain”) se enfrentan a múltiples criterios de desempeño económico y ambiental en conflicto. Este tipo de escenario da lugar a que los enfoques MCDM sean la herramienta apropiada para el apoyo en la toma de decisiones.

2.2.1. Clasificación de MCDM

Branke et al. [7] afirma que los problemas MCDM pueden clasificarse de muchas formas distintas, dependiendo de las características del problema en cuestión. Por un lado, según Branke et al. [7] hablamos de análisis de decisiones de atributos múltiples o multiatributo (MADM de ahora en más) si tenemos un conjunto predefinido de alternativas a considerar. Por otro lado, en la optimización multiobjetivo o problemas de toma de decisión multiobjetivo (MODM de ahora en más) se desconoce explícitamente el conjunto de soluciones factibles de antemano, a pesar de ser éste restringido por funciones de restricción.

En la misma línea de clasificación, Kumar et al. [36] indica que MCDM puede clasificarse en base al número de alternativas bajo consideración. En este caso, se diferencia MADM de MODM. Agrega además que MODM es adecuado para la evaluación de alternativas continuas, para las cuales se predefinen restricciones en forma de vectores. Se puede visualizar el esquema de esta clasificación en la Fig. Figura:ele2.

Asimismo, Branke et al. [7] indica que los problemas de optimización multiobjetivo se caracterizan por que no exista una única solución, sino que es posible identificar un conjunto de soluciones de la misma calidad. Dichas soluciones se conocen como no dominadas, eficientes, no inferiores o *Soluciones óptimas de Pareto*. Algunos de los abordajes clásicos de MODM están dados por metodologías tales como Programación por Metas (Goal Programming), ϵ -restricción y el Método de los Pesos [4].

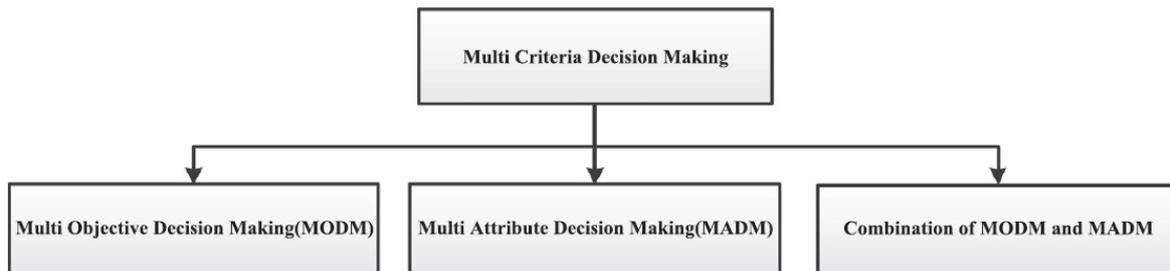


Figura 3: Clasificación según el número de alternativas. Fuente: [40]

En Branke et al. [7] indican que el problema MODM implica ayudar a un tomador de decisiones al momento de considerar múltiples objetivos simultáneamente, y en encontrar la solución Pareto Óptima de mayor agrado. Por esto mismo, el proceso de solución necesita de cierta participación del tomador de decisiones (o centro decisor), de tal forma que especifiquen la preferencias y las mismas se vean reflejadas en la solución final.

Otra forma de clasificar al problema MCDM es con enfoques [36], siendo esta una técnica más amplia. Aquí los enfoques dependen de la perspectiva del desarrollador. Los enfoques se diferencian según un enfoque directo o indirecto. En el directo, los pesos o prioridades se dan en base a aportes de los beneficiarios o la sociedad, en base a encuestas. Por otro lado, en el método indirecto el peso es asignado a los criterios por analogías con problemas similares, o experiencia del centro decisor [36]. Esta clasificación puede verse en la Fig. Figura:ele3.

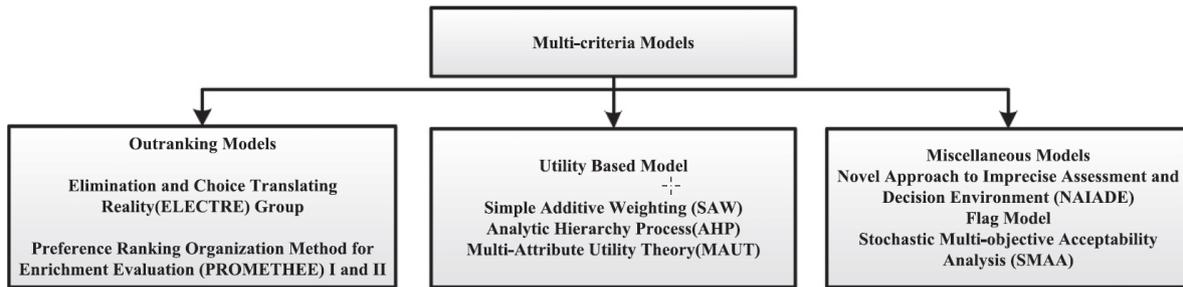


Figura 4: Clasificación de MCDM según enfoques. Fuente: [49]

2.2.2. Algunos modelos multicriterio

A continuación se presentan algunos de los modelos más utilizados en MCDM.

- **AHP:** El Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process da lugar a sus siglas) es un modelo creado por Saaty en la década de los 80 y actualmente uno de los más populares y poderosos para la toma de decisiones [16]. AHP establece prioridades a través de comparaciones entre pares de alternativas bajo un mismo criterio o propiedad común. Además, compara la intensidad de importancia de un criterio sobre otro. Posteriormente, AHP sintetiza todos los juicios, utilizando la jerarquía establecida para obtener la prioridad general de los elementos [16].
- **TOPSIS:** Sus siglas provienen de su nombre en inglés ‘Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions’, y es un modelo muy utilizado en logística, ingeniería química y problemas de gestión de la energía [36]. Dicho modelo consiste en calcular las soluciones ideales positivas y negativas respectivamente, y luego calcular la distancia de Euclides relativa a dichas soluciones [71], [32].
- **VIKOR:** Sus aplicaciones se encuentran en los rubros de la Ingeniería mecánica, manufactura, políticas energéticas y medicina [36]. Este modelo se asemeja a TOPSIS en el sentido que calcula las distancias relativas a la mejor y peor solución. En este caso, las distancias son normalizadas y ponderadas según Manhattan y Chebyshev [39].
- **ELECTRE:** El método ELECTRE (de su nombre en inglés ‘Elimination and Choice Translating Reality’) consiste en reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes [51]. Para ello, se distinguen entre alternativas más y menos favorables para el centro decisor. En este sentido, el método ‘sobrecalifica’ a las distintas alternativas entre sí, alegando que la alternativa A sobrecalifica a la alternativa B si A es al menos tan buena como B, bajo un determinado conjunto de atributos. Además, ELECTRE define los conceptos de concordancia y discordancia para determinar hasta qué punto A es mejor que B y viceversa, bajo un determinado conjunto de atributos. Por último, se rankean las distintas alternativas tomando como insumo lo descrito anteriormente [36]. En cuanto a las aplicaciones del método, se distinguen la gestión de energía, finanzas y negocios, transporte logístico y tecnologías de la información y comunicación [36].
- **PROGRAMACIÓN POR METAS:** Este método será profundizado en la siguiente sección.
- **PROGRAMACIÓN LINEAL FÍSICA:** La programación lineal física (LPP de sus siglas en inglés ‘Linear Physical Programming’), es una técnica de optimización multicriterio similar a programación por metas. En ambos casos se intenta aproximar los objetivos a determinados valores. Sin embargo, LPP permite que el centro decisor indique sus preferencias en rangos, a diferencia de la programación por metas tradicional, en donde a cada criterio se le asigna una meta con un único valor [28].

2.3. Programación por metas

La programación por metas es un método de resolución multicriterio que no busca un valor óptimo, sino satisfacer metas y niveles previamente estipulados. Busca fijar niveles de aspiración para las distintas funciones objetivo y luego encontrar soluciones que se aproximen lo más posible a estos.

Al igual que con los demás problemas multicriterio, la formulación de un problema multicriterio sigue los siguientes pasos:

1. Fijar los criterios del problema ($f(x)$) que sean relevantes a partir de variables de decisión (x).
2. Asignar a cada uno de ellos un nivel de aspiración por parte del centro decisor (t).
3. Conectar el criterio con el nivel de aspiración por medio de variables de desviación negativa y positiva, respectivamente (n y p). La variable de desviación negativa cuantifica la falta de logro de una solución con respecto a su nivel de aspiración, mientras que la variable de desviación positiva cuantifica el exceso de logro de una solución con respecto a su nivel de aspiración.

De esta manera, la expresión alebraica de una meta i es:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad (1)$$

La programación por metas busca minimizar las variables de desviación no deseadas dentro de la zona factible del problema (F). La manera en que se hace dicho proceso de minimización dicta qué variante de programación por metas se utiliza [51]. Por lo tanto, un modelo genérico de programación por metas se ve de la siguiente manera:

$$\text{Min } a = h(n, p) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad i = 1 \dots I \quad (3)$$

$$x \in F \quad (4)$$

$$n_i, p_i \geq 0 \quad i = 1 \dots I \quad (5)$$

Donde h es una función genérica de las variables de desviación. Se presentarán a continuación distintas variantes de programación por metas desarrolladas por los autores Jones, D. y Tamiz, M [26].

2.3.1. Programación por metas lexicográficas

Esta variante del método de programación por metas se distingue por la existencia de niveles de prioridad que contienen ciertas variables de desviación a ser minimizadas lexicográficamente. Es decir que, la minimización de las variables de desviación de los niveles más altos es prioritaria a la de los niveles más bajos, lo que produce una serie de optimizaciones secuenciales, dejando fijados los valores mínimos de los niveles prioritarios y reduciendo la zona factible del problema. Esto conduce a la siguiente formulación:

$$\text{Lex Min } a = [h_1(n, p), h_2(n, p), \dots, h_I(n, p)] \quad (6)$$

Sujeto a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad i = 1 \dots I \quad (7)$$

$$x \in F \quad (8)$$

$$n_i, p_i \geq 0 \quad i = 1 \dots I \quad (9)$$

2.3.2. Programación por metas ponderadas

La programación por metas ponderada permite balancear las variables de desviación no deseadas asociándoles distintos pesos normalizados en una única función objetivo. Siendo u y v los pesos asociados a las variables y k el denominador que normaliza la función, el método se formula de la siguiente manera:

$$\text{Min } a = \sum_{n=1}^I \left(\frac{u_i n_i}{k_i} + \frac{v_i p_i}{k_i} \right) \quad (10)$$

Sujeto a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad i = 1 \dots I \quad (11)$$

$$x \in F \quad (12)$$

$$n_i, p_i \geq 0 \quad i = 1 \dots I \quad (13)$$

2.3.3. Método Chebyshev

También conocida como Minmax, esta variante busca minimizar la máxima desviación de cualquier meta. Es aplicada en los casos en que el centro decisor busca una solución balanceada con respecto a todos los niveles de satisfacción de todas las metas. Siendo λ la máxima desviación de la serie de metas, este método se formula:

$$\text{Min } a = \lambda \quad (14)$$

Sujeto a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad i = 1 \dots I \quad (15)$$

$$\frac{u_i n_i}{k_i} + \frac{v_i p_i}{k_i} \leq \lambda \quad i = 1 \dots I \quad (16)$$

$$x \in F \quad (17)$$

$$n_i, p_i \geq 0 \quad i = 1 \dots I \quad (18)$$

2.3.4. Programación por metas Fuzzy

Fuzzy goal programming agrega el manejo de imprecisión a la programación por metas. Para ello, utiliza la teoría de Zadeh denominada como Fuzzy Set Theory [69]. La imprecisión se relaciona generalmente con los valores objetivo, aunque también se puede relacionar con otros aspectos en la estructura de la programación por metas.

2.3.5. Programación por metas entera y binaria

La programación por metas entera y binaria restringen una o más variables de decisión a un número discreto de valores. Esto resulta en problemas más difíciles de resolver que problemas únicamente lineales. Por ende, esta clase de programación por metas tiende a tiempos de resolución más largos y un número de variables de decisión y restricciones más acotado para que su resolución sea viable.

3. Revisión sistemática de la literatura

A continuación, se presenta un relevamiento de la literatura sobre las decisiones multicriterio al final de la vida útil de los productos usados, con el objetivo de analizar las investigaciones y los distintos rubros de aplicación en los últimos años.

La búsqueda de la literatura es realizada a través de una revisión sistemática, de forma tal que pueda ser repetida y/o verificada. La misma es elaborada entre los días 26 de mayo y 16 de junio del año 2021. Es importante destacar que en esta búsqueda solo se consideran los documentos con situaciones deterministas. A su vez, se incluyen únicamente artículos, documentos de conferencia, revisiones y capítulos de libros como tipos de documentos.

3.1. Metodología de búsqueda

Con el objetivo de poder realizar una revisión sistemática repetible, es necesario determinar una serie de pasos que permitan obtener los mismos resultados al realizarla nuevamente. El flujo de procesos ejecutados en esta revisión bibliográfica se pueden observar en la Fig. fig:2 y son los siguientes:

1. Definición de las búsquedas a realizar, así como también la determinación de tres bases de datos iniciales.
2. Consolidación de los resultados de las búsquedas anteriores y eliminación de artículos duplicados.
3. Exclusión de ciertas publicaciones debido a que su contenido se extiende de la temática a abordar.
4. Repetición de la búsqueda en una nueva base de datos.
5. Eliminación de publicaciones por diversos motivos, los cuales se detallan en la sección correspondiente.

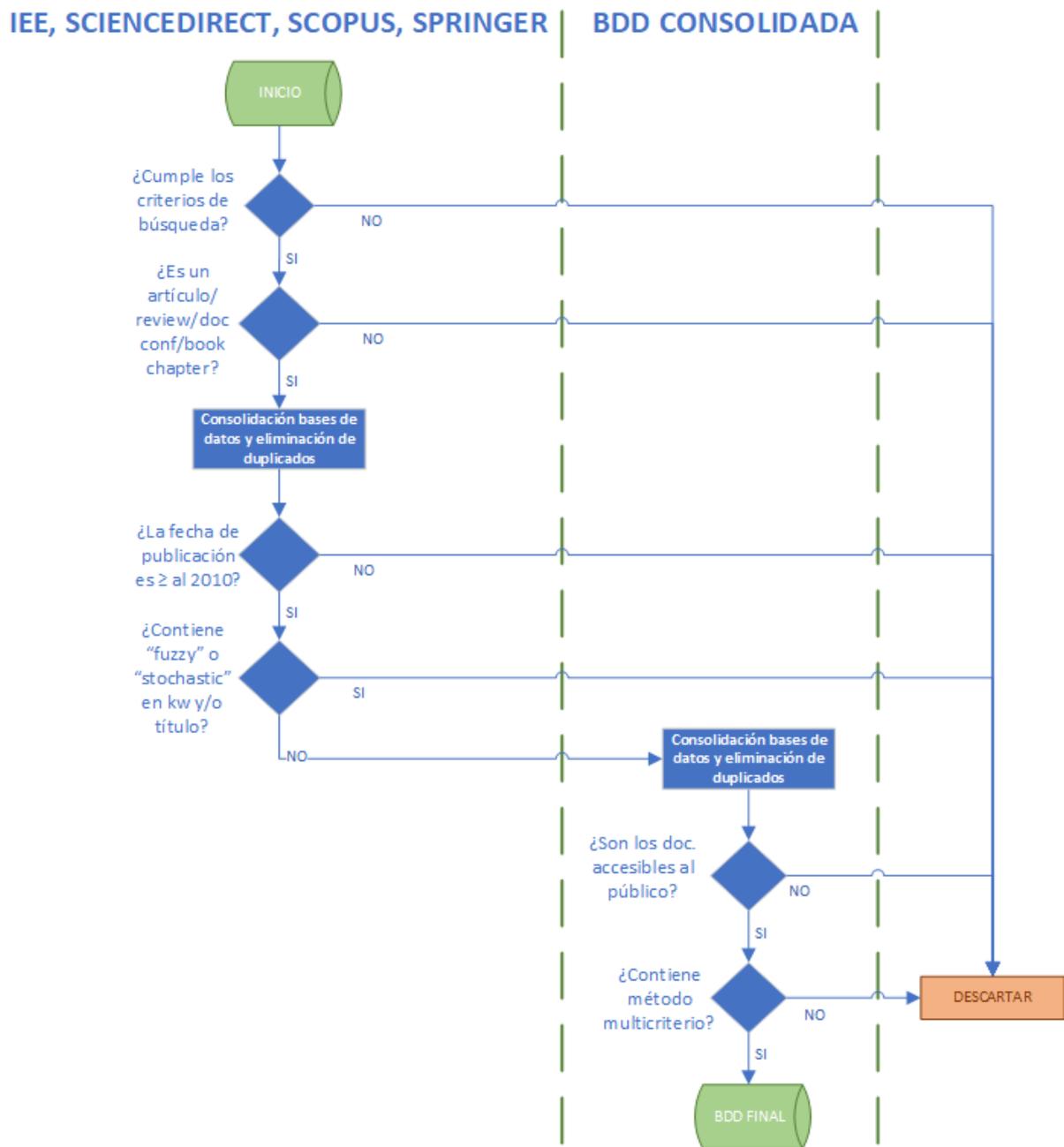


Figura 5: Flujo de procesos en la revisión bibliográfica. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Definición de las búsquedas a realizar

En primer lugar, las colecciones consultadas para recabar la bibliografía son IEEE, ScienceDirect y Scopus. A su vez, la búsqueda incluye artículos, revisiones, informes de conferencia y capítulos de distintos libros.

La recolección de artículos abarca cuatro búsquedas distintas. Las mismas se deben realizar utilizando la búsqueda avanzada de las bases de datos mencionadas anteriormente, en donde se determina que los documentos contengan una combinación de palabras en el abstract, keywords y/o título. Es importante mencionar que los resultados de las búsquedas son realizadas en la base de datos de Scopus en primer lugar, para luego tomar los resultados de las otras bases y agregar únicamente los artículos que no habían sido abarcados por Scopus. Las búsquedas se indican a continuación:

(Goal Programming AND Remanufacturing)
(Goal Programming AND Close Loop Supply Chain) OR (Goal Programming AND Closed Loop Supply Chain)
(Goal Programming AND Reverse Logistics)
(Remanufactur* AND Multi Criteria)

Al realizar la búsqueda de “Goal Programming AND Remanufacturing” se obtienen 21 resultados, de los cuáles 16 son recabados en la base de datos Scopus y los restantes 5 de ScienceDirect. Primero se toman los 16 resultados de Scopus, para luego complementarlo con 5 artículos nuevos encontrados en ScienceDirect. Esto no necesariamente quiere decir que los resultados para esta búsqueda en ScienceDirect son únicamente 5, o que IEEE no tiene resultados encontrados para esta búsqueda. Por lo contrario, esto hace referencia a que únicamente son 5 los archivos que no fueron encontrados por Scopus pero sí en las otras bases.

Por otro lado, las colecciones IEEE y Science direct no contienen resultados adicionales para la búsqueda “Goal programming AND Close Loop Supply Chain”, por lo que los 39 artículos asociados a esta combinación de palabras provienen de Scopus.

La búsqueda “Goal programming AND Reverse Logistics” contiene 39 resultados de la colección de Scopus, 2 artículos en ScienceDirect y una única publicación en IEEE.

Por último, la búsqueda “Remanufactur* AND Multi Criteria” es realizada utilizando el truncamiento de la palabra remanufacturar”. De esta forma, se toma este término como raíz pero también se duelen resultados con los términos “remanufacturing” y “remanufactured”. Luego de realizar esta búsqueda se obtienen 59 resultados, de los cuales 58 artículos provienen de la base de datos de Scopus y 1 artículo de ScienceDirect. En la Tabla tab:1 se puede observar la cantidad de resultados obtenidos de cada búsqueda en cada colección. Es importante mencionar que la abreviatura GP hace referencia al concepto de Goal Programming, RM a remanufacturing, Closed Loop Supply Chain se abrevia como CSLC, Reverse Logistics como RL y MC hace referencia al Método Multicriterio.

Búsqueda/Colección	Scopus	ScienceDirect	IEEE	Total
GP AND RM	16	5	0	21
GP AND CLSC	39	0	0	39
GP AND RL	39	2	1	42
RM AND MC	58	1	0	59

Tabla 1: Cantidad de artículos por búsqueda y colección

3.1.2. Consolidación de los resultados de las búsquedas anteriores y eliminación de artículos duplicados

Una vez realizadas las cuatro búsquedas, es necesario consolidar los resultados, de forma de obtener un único conjunto de archivos. De este modo, 161 artículos son recabados.

Sin embargo, dado que las búsquedas se llevan a cabo aisladamente, puede ocurrir que ciertas publicaciones se repitan en más de una. Esto genera la duplicación de artículos en la base de datos consolidada. Para ello, es necesario determinar aquella bibliografía recabada en más de una búsqueda y eliminar los sobrantes, dejando una sola vez el archivo en la base de datos final. Consolidando los resultados de las cuatro búsquedas, se eliminan 18 artículos. De esta forma, la base de datos consolidada contiene 143 publicaciones.

3.1.3. Exclusión de ciertas publicaciones debido su contenido

El siguiente paso de esta metodología consiste en hacer un filtrado de algunas publicaciones debido a que su contenido se extiende de la temática abordada.

En primer lugar, se descartan los artículos cuya fecha de publicación sea anterior al 2010. Luego, se eliminan los artículos que contienen en las keywords y/o en el título las palabras “Fuzzy” y “Stochastic”, debido a que esta revisión bibliográfica se enfoca en trabajos con modelos sin consideraciones de incertidumbre. Al realizar el primer filtro, 75 artículos son eliminados. Luego, de las 68 publicaciones restantes, 11 artículos contienen las palabras “Fuzzy” y “Stochastic” en las keywords y/o título. De esta forma, la base de datos de este paso de la metodología contiene 57 artículos.

3.1.4. Eliminación de publicaciones por diversos motivos.

El último paso de esta metodología consistió en excluir algunas publicaciones por distintos motivos. En primer lugar, se excluyen aquellos artículos que no se pudieron leer debido a que no se tiene acceso. El número de trabajos eliminados por esta razón son 5.

Luego, durante la lectura de los restantes artículos se revela que 10 publicaciones consideran la incertidumbre en los modelos a pesar de que no contengan las palabras “Fuzzy” y “Stochastic” en las keywords y/o abstract. Bajo el mismo criterio del tercer paso de la metodología, estos archivos son excluidos de la base de datos de resultados. Por último, también se filtran los documentos que, si bien son resultados de las búsquedas, no contienen métodos multicriterio, por lo que no aportan al contenido esperado del estado del arte. Eliminando estos artículos, la base de datos final útil para el contenido del estado del arte abarca 38 documentos.

3.1.5. Clasificación de los artículos.

Los 38 documentos recabados en la búsqueda fueron clasificados dentro de cuatro categorías para analizar: Cadena de suministro, Decisiones estratégicas en la economía circular, Planificación de la producción y Revisión bibliográfica. En la Tabla tab:2 se puede observar las distintas categorías y la cantidad de documentos recabados en cada una.

Categoría	Cantidad de artículos
Cadena de suministro	7
Decisiones estratégicas en la economía circular	10
Planificación de la producción	18
Revisión bibliográfica	3

Tabla 2: Cantidad de artículos por categoría

3.2. Análisis de los resultados

Esta sección provee un análisis estadístico sobre los 38 artículos que fueron recolectados luego de realizar todos los pasos de la metodología anterior y se consideraron en el contenido del estado del arte.

Como se puede observar en la Fig. fig:3, más del 60 % de las publicaciones corresponden al tipo de documento de artículo. A su vez, cerca del 30 % corresponden a documentos de conferencia, y los restantes documentos son revisiones o capítulos de un libro. Se considera importante destacar que, si bien un solo archivo es del tipo de documento de revisión, en la sección clasif fueron tres los artículos que se clasificaron dentro de la categoría de revisión bibliográfica.

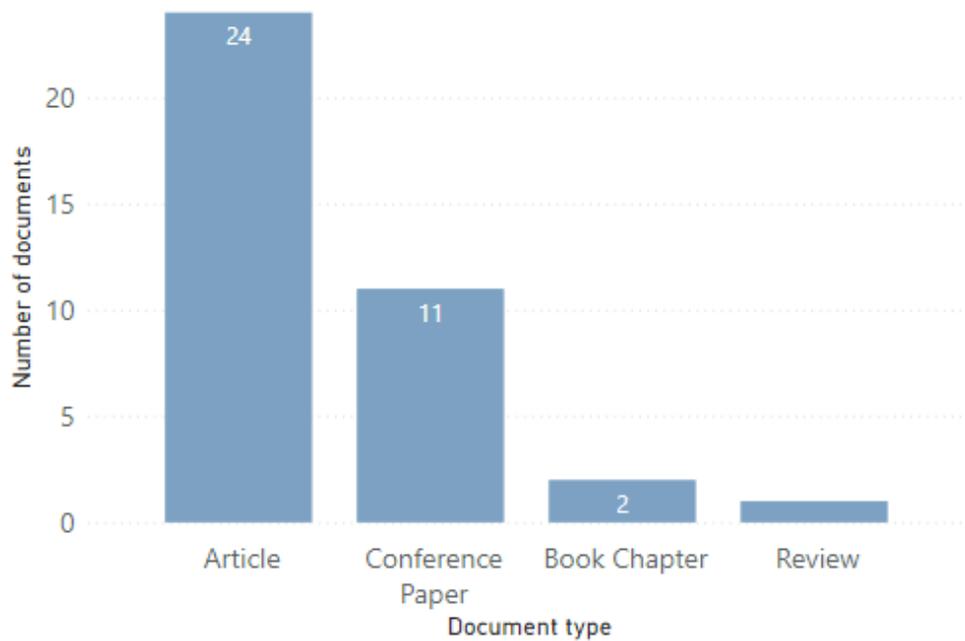


Figura 6: Cantidad de artículos por tipo de documento. Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de los documentos recabados son artículos, mientras que la cantidad de publicaciones de los documentos de conferencia es considerablemente menor. Sin embargo, como es posible observar en la Fig. fig:4, ambos tipos de documentos tienen una frecuencia de publicación constante a lo largo de los años, siendo distinto para los capítulos de libros y revisiones bibliográficas.

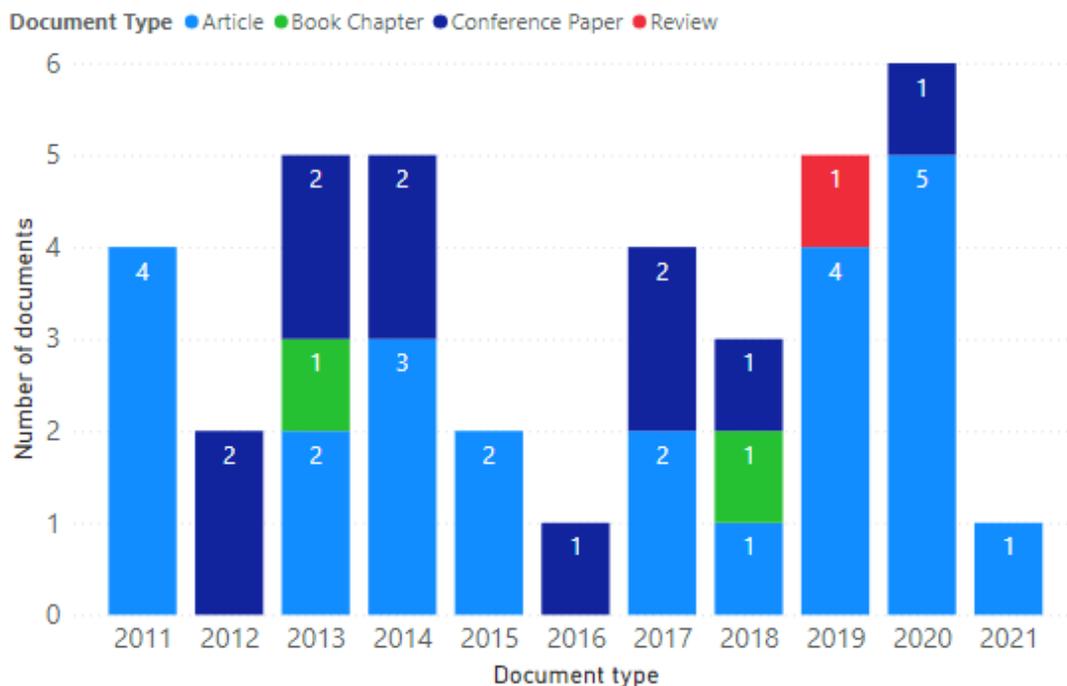


Figura 7: Cantidad de artículos por tipo de documento. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, resulta de interés realizar un análisis cuantitativo de las publicaciones según la clasificación mencionada en la sección clasif. En la Tabla tab:3 se muestra el número de artículos publicados sobre cada categoría a lo largo de los años 2011 y 2021.

Es posible observar que más del 60 % de las publicaciones abordan la temática de la planificación de la producción. A su vez, la mayor cantidad de artículos correspondiente a esta clasificación son publicados en los años

2013 y 2014.

La clasificación de decisiones estratégicas en la economía circular es la siguiente con mayor cantidad de publicaciones luego de planificación de la producción. Un 25 % de los artículos abordan esta temática a lo largo de todos los años. Sin embargo, a partir del 2017 es cuando se publica un número significativo del total de los artículos de esta categoría.

Un 17 % de los artículos abordan la temática de la cadena de suministro durante el período de tiempo estudiado. Sin embargo, es importante aclarar que entre los años 2016 hasta el 2019, no se encontró ningún artículo publicado sobre la temática abordada en esta búsqueda realizada.

Únicamente son tres los artículos que plantean una revisión bibliográfica. Los mismos son publicados igualmente distribuidos a lo largo del período de estudio.

Año	Cadena de suministro	Decisiones estratégicas en la economía circular	Planificación de la prod.	Revisión bibliográfica	Total
2011	1	2	0	1	4
2012	1	1	0	0	2
2013	1	0	4	0	5
2014	1	1	3	0	5
2015	1	0	0	1	2
2016	0	0	1	0	1
2017	0	2	2	0	4
2018	0	0	3	0	3
2019	0	1	3	1	5
2020	1	3	2	0	6
2021	1	0	0	0	1
Total	7	10	18	3	38

Tabla 3: Cantidad de artículos por categoría

Por último, es importante observar que los años 2014 y 2020 contienen la mayor cantidad de artículos publicados respecto al resto. A continuación se presenta un gráfico ilustrando el comportamiento de la cantidad de artículos según cada categoría publicadas año a año.

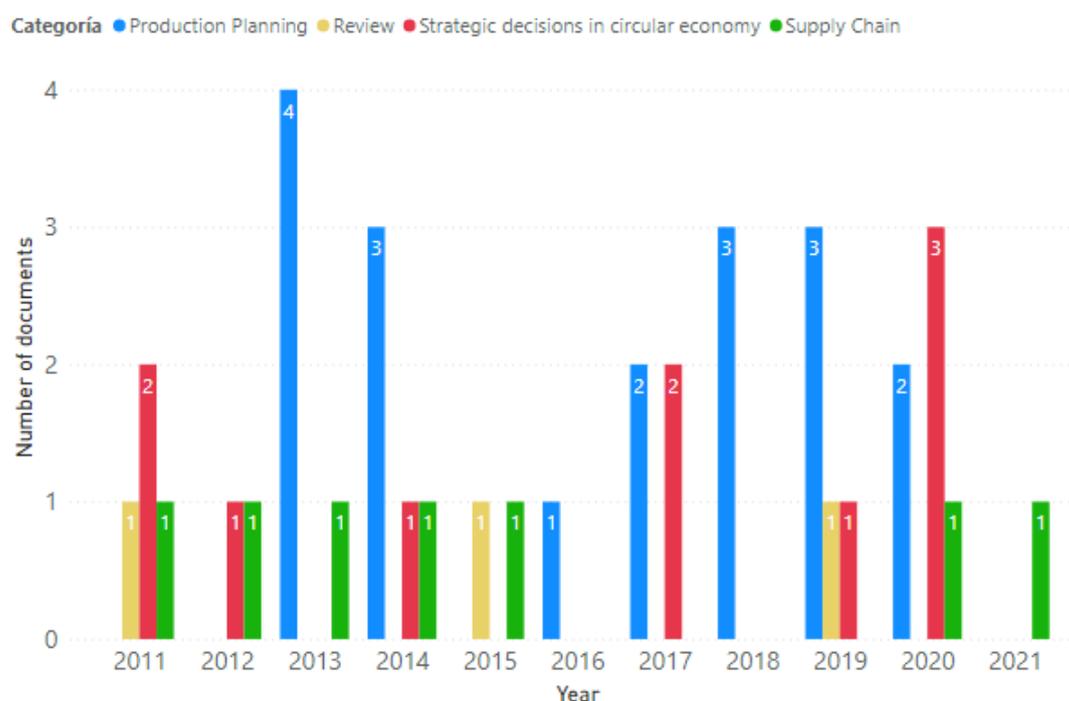


Figura 8: Cantidad de artículos por tipo de documento. Fuente: Elaboración propia.

4. Análisis de los documentos recabados

Se decidió clasificar a los 38 documentos dentro de las siguientes categorías: Cadena de suministro cds, Decisiones estratégicas en la economía circular ec, Planificación de la producción pp y Revisión bibliográfica rb. Dentro de estas se describirán los documentos que la componen, abarcando objetivos, métodos de resolución y otros hallazgos de interés.

Cabe destacar que, si bien existen documentos que podrían encontrarse en más de una categoría, se ubicaron en solo una a modo de simplificar la comprensión y lectura del documento.

4.1. Cadena de suministro

En esta primer categoría se agrupan 7 de los 38 documentos que integran la revisión sistemática de la literatura. Como se indica en el título de la sección, los textos abordan la temática de cadena de suministro con una perspectiva de sustentabilidad, variando los enfoques. Entre estos últimos se encuentran recuperación de productos EOL, logística inversa y cadenas de suministro cerradas.

Para comenzar, Dutta et al. [13] se basan en el contexto de la India para modelar la creación de una cadena logística inversa sustentable para empresas de e-commerce. El método que utilizan es programación por metas ponderadas, y los objetivos planteados contemplan minimizar los costos de la cadena, minimizar impactos ambientales asociados al transporte, operaciones y procesos de reciclaje, y maximizar la responsabilidad social mediante la creación de empleos y minimización de días perdidos por accidentes laborales. Mediante Excel resuelven el modelo, indicando qué locales habilitar, diferenciando entre puntos de entrega, centros de incineración, vertederos, centros de reciclaje y locales de venta al público.

Por otro lado, Moghddam [43] presenta su trabajo en 2 etapas. En la primera se selecciona y reduce el número de proveedores a través de AHP. Esto será insumo de la etapa siguiente, donde modela una cadena de suministro cerrada, incluyendo desmontaje y refurbishing con el objetivo de optimizar el número de productos en cada eslabón de la cadena. Esto se realiza contemplando maximizar ganancias, minimizar riesgos, partes defectuosas compradas y tiempos de entrega tardíos. Utiliza la técnica de simulación de Monte Carlo integrada con tres variantes del método de programación por metas para resolverlo: preemptive, compromiso y fuzzy.

De forma análoga al caso anterior, Sheng et al. [56] trabajan en 2 etapas. En este caso, el objetivo que tienen es seleccionar una empresa tercerizada para la gestión de la logística inversa. A partir de una cantidad finita de empresas y varios criterios distintos para valorarlas, en primer lugar utilizan AHP para ponderar dichos criterios. Posteriormente, utilizan programación por metas ponderadas teniendo como insumo las ponderaciones del paso anterior para la selección de la empresa.

Otro ejemplo de modelo de cadena suministro cerrada es el que presentan Pazhani et al. [47]. En este caso, los objetivos del modelo son maximizar la eficiencia del servicio, minimizando los costos asociados a qué depósitos utilizar. Asimismo, determina la distribución de productos en distintas localidades y la cantidad de productos nuevos y remanufacturados a producir. Se resuelve dicho modelo utilizando programación por metas ponderadas, Min-Max, Fuzzy y Programación por Compromiso.

Distinto es el caso presentado en [9], donde Darbari et al. hacen foco en el valor de los productos EOL y buscan maximizarlo. Lo logran a través de un modelo de recolección, inspección, fabricación, desmontaje y reciclado que también persigue la minimización de emisiones de carbono determinando el ruteo y selección de vehículos. Utilizan programación por metas para elaborarlo y lo resuelven con LINGO 11.0.

Otro documento que toma la capacidad de los vehículos en consideración se encuentra en [11]. En este caso, Defalque et al. resuelven con programación por metas ponderadas un modelo de la logística de los residuos de papel. Con esto buscan maximizar los residuos recolectados, minimizar las distancias en los viajes de recolección, maximizar la producción de paquetes de papel y las ventas de éstos, y minimizar costos. Como ventaja, el modelo es rico en parámetros y variables, lo que permite modelar el ruteo con distintas capacidades, stockear y recibir papel sin recolección.

Por último, Harraz y Galal en [21] representan una red de recolección y recuperación de vehículos ELVs (de sus siglas en inglés "End of Life Vehicles") en la India, a través de un modelo lexicográfico de programación por metas. Los objetivos del mismo son determinar la ubicación de centros de recolección de dichos ELVs y sus centros de recuperación, así como también la capacidad de estos. Los objetivos contemplan aspectos económicos, sociales y ambientales.

4.2. Decisiones estratégicas en la economía circular

En esta categoría se encuentran 10 de los 38 documentos obtenidos a partir de las búsquedas bibliográficas mencionadas en la sección rev. En este caso, los documentos se centran en herramientas multicriterio para la toma de decisiones a nivel estratégico de las organizaciones u empresas que describen. Mayoritariamente, se comparan distintas prácticas o estrategias sostenibles.

Dos de los documentos de esta categoría se centran en la selección de materiales para la producción de artículos. En primer lugar, Mesa et al. [42] presentan un indicador elaborado para medir la durabilidad de los materiales (MDI de sus siglas en inglés). El mismo sumaria en un número los aspectos mecánicos, químicos y ambientales de cada material, siendo estos ponderados mediante la metodología multicriterio AHP. Posteriormente, utilizan el MDI para seleccionar el material para la elaboración de una prótesis con tecnología 3D. Por otro lado, Jayakrishna y Vinodh [24] aplican la selección de materiales en una empresa automotriz de la India. Allí utilizan el método multi-criterio de análisis relacional gris (GRA, de sus siglas en inglés "Grey Relational Analysis") teniendo en cuenta la minimización de costos, propiedades de materiales e impactos ambientales.

Nikanorova y Stankevičienė [44] comparan ocho países bálticos en el desarrollo de los pilares ambientales dentro del contexto de economía circular, a través de dos metodologías multicriterio: TOPSIS y MULTIMOORA. Ambos métodos son utilizados en paralelo, y como resultado obtienen un ranking de los 8 países donde coinciden Suecia, Dinamarca y Alemania en la cabecera.

Por otro lado, algunos investigadores centran sus estudios en la selección de estrategias o prácticas medioambientales en distintas organizaciones o empresas. Alamerew et al. [2] presentan una metodología multicriterio para la selección de una estrategia de economía circular adecuada. Para ello, comparan y evalúan distintas alternativas utilizando puntajes y ponderaciones, en 2 empresas distintas. Además, es importante mencionar que toman en consideración 6 criterios distintos para desarrollar dicho análisis. Más adelante, Alamerew y Brissaud presentan PR-MCDT (Product recovery - multi criteria decision tool), otra metodología para la toma de decisiones a nivel estratégico de cómo recuperar artículos al final de su vida útil [1]. Por último, Shankar et al. proponen comparar distintas prácticas sostenibles en la manufactura de la India [55]. Detallan el procedimiento elegido para comparar las distintas prácticas sostenibles, teniendo en cuenta antecedentes bibliográficos y la opinión de expertos. Seguidamente, comparan y analizan 22 prácticas sostenibles utilizando el método multicriterio DEMATEL (decision making trial and evaluation laboratory), destacando como a la mejor a la “Promoción del concepto 6R”.

En el caso presentado en [31], Kannan et al. identifican las motivaciones que afectan la implementación de gestión de neumáticos EOL. Para ello, utilizan la herramienta de toma de decisiones multicriterio “Modelo Estructural Imperativo” (ISM de sus siglas en inglés), para analizar dichas motivaciones. TenieKavita and Yadavndo en cuenta la responsabilidad ampliada del productor, la presión de las partes interesadas y entre otros factores la escasez de recursos, los autores validan la herramienta aplicándola sobre un caso práctico en la India.

En la línea de programación por metas, Huang et al. [22] optimizan el diseño de sistemas de servicios de productos (en inglés, PSS). Dentro de los objetivos planteados, se contemplan la ganancia, consumo de energía y satisfacción del cliente; asimismo, se satisfacen requisitos referentes a las limitaciones sociales y ambientales. Los resultados de este modelo son posteriormetente comparados con uno en donde únicamente el componente económico es tenido en cuenta como objetivo.

Por último, Jiang et al. [25] presentan un modelo de toma de decisiones multicriterio, AHP, para la selección de tecnología de manufactura. Consideran en el beneficios económicos y ambientales, a través de 6 criterios distintos: costo, calidad, tiempo, servicio, consumo de recursos e impacto ambiental. Luego, aplican el modelo en una fábrica de válvulas para plantas de energía. Por otro lado, Vadde et al. [60] utilizan AHP como insumo dentro de un algoritmo genético. Aquí los autores presentan el problema de la determinación de precios de componentes reutilizables y reciclables, teniendo en cuenta maximizar ingresos, minimizar costos de recuperación de producto y estabilizar las fluctuaciones de inventario. AHP determina qué ponderación corresponde a cada criterio, dentro de la función objetivo del modelo.

4.3. Planificación de la producción

En esta categoría se encuentran 18 de los 38 documentos obtenidos a partir de las búsquedas bibliográficas mencionadas en la sección rev. Estos documentos aportan al problema de la planificación de la producción desde distintos puntos de vista, incluyendo decisiones sobre los tipos y cantidades de productos a producir, su tipo de producción, los recursos utilizados para la misma y su vínculo con la cadena de suministro de los distintos sistemas.

Varios de los documentos se encuentran enmarcados en sistemas de remanufactura-bajo-pedido y desmontaje-bajo-pedido (ARTODTO, sigla proveniente del inglés). En primer lugar, se encuentran Ondemir y Gupta, quienes plantean un modelo de programación por metas lexicográfico sobre un sistema de ARTODOTO [45]. Dicho modelo busca seleccionar qué productos del inventario que están en el final de su vida útil se van a procesar y qué tipo de operación se les realizará para recuperarlos, de manera de satisfacer la demanda de los clientes. Este modelo fue resuelto con programación por metas lexicográfico y atendiendo a tres objetivos: minimizar el costo total del sistema, atender la responsabilidad ambiental, y maximizar las ganancias. En este caso, el modelo toma datos de calidad de los productos a través del “Internet de las cosas”, estudiándose una aplicación en secadores con sensores y etiquetas RFID, y obteniendo la solución con CPLEX v12.1.

Ondemir y Gupta modelaron nuevamente un sistema ARTODOTO con un enfoque multicriterio y sensores RFID para obtener datos de condiciones de retorno de los productos y lograr planes óptimos contra pedido de desmontaje, reparación, desecho y reciclado [46]. En esta instancia, utilizaron programación lineal física para optimizar objetivos contrapuestos, como lo son minimizar el costo total y el número de artículos deshechos, y maximizar ganancias y nivel de servicio. La solución del problema, obtenida con Matlab y LINGO 11.0, devuelve los números de serie de los artículos a tratar, así también como las operaciones que se les deberán hacer para satisfacer la demanda de los clientes.

Joshi y Gupta presentan un sistema ARTODTO, que se caracteriza por recibir productos al final de su vida útil (EOLs) que cuenten con etiquetas RFID y sensores embebidos [27]. Gracias a estos últimos, se cuenta con infor-

mación objetiva del estado de los EOLs recibidos. Los autores utilizan programación por metas y programación lineal física para modelar el sistema con el objetivo de indicar un plan de desmontaje, reciclado, remanufactura, almacenamiento y disposición de los EOLs recibidos. Para ello, se tienen en cuenta la maximización de beneficios, calidad, valor del material, y minimización de disposición final. Los autores aplican el modelo con un caso práctico con 200 aires acondicionados. La solución obtenida no solo indica un plan ARTODTO, sino que además compara los diseños según las posibles ventajas de cada uno en sus usos posteriores.

Los mismos autores presentan otro modelo ARTODTO [29] para evaluar las alternativas de diseño de distintos proveedores y determinar cuál es la mejor para desmontaje y remanufactura, así como también las cantidades a adquirir de cada producto para satisfacer la demanda. Los autores utilizan programación por metas para evaluar cuatro criterios: beneficio total, costo de adquisición, costo de compra y costo de eliminación, presentando un ejemplo práctico con tres tipos de secadoras de ropa.

Joshi y Gupta vuelven a presentar un sistema ARTODTO que indica las acciones a tomar para determinado producto EOL [28]. Utilizan programación física lineal para modelar dicho problema. Los objetivos que se tienen en cuenta son maximizar ganancias, maximizar la calidad de los productos y minimizar las disposiciones. Como insumo de datos, se tienen en cuenta los requerimientos del centro de decisión y los datos de sensores y RFIDs embebidos en los productos EOLs a estudiar. Para ejemplificar, el modelo fue aplicado a 200 laptops con sensores y etiquetas RFIDs embebidos, y con ello se obtuvo la recomendación para cada ítem.

Otro tema de relevancia en el marco de los documentos de esta categoría es el manejo y planificación de residuos de equipos electrónicos y eléctricos (WEEE, sigla proveniente del inglés). Li et al. describen un método de planificación de desmontaje selectivo con modelos de toma de decisiones multicriterio [37]. Se utiliza el método de optimización de enjambre de partículas (PSO: particle swarm optimization) integrado con un algoritmo genético para manejar las restricciones de precedencia entre las operaciones de desmontaje. Con el objetivo de desarrollar un modelo que procese varios tipos de WEEE y que cumpla con distintos requisitos de las partes interesadas, se tienen en cuenta los siguientes índices: de peligrosidad de la operación de desmontaje, el valor de recuperación potencial de los componentes, y el índice de peso retirado por las operaciones de desmontaje. Plantean un ejemplo práctico de televisores con pantalla de cristal líquido LCD para validar la investigación. Li et al. vuelven a plantear el problema, esta vez en formato de artículo [38].

Xia et al. también desarrollan un modelo de toma de decisiones multicriterio para la planificación selectiva de desmontaje de WEEEs, teniendo en cuenta consideraciones legislativas y económicas de distintas partes interesadas (reguladores, remanufacturadores) [67]. Para eso, diseñan y utilizan un enfoque de planificación de desmontaje selectivo basado en QLearning (QL-SDP) como servicio de un sistema de reacondicionamiento basado en la nube (CBRS). El enfoque Q learning evalúa la utilidad de realizar el desmontaje en determinado estado. Para modelar el proceso de desmontaje selectivo y considerar sus restricciones, se utiliza el enfoque Disassembly Petri Net (DPN). El servicio QL-SDP es un tipo de servicio para la toma de decisiones que requiere información de entrada adquirida de los servicios de información en el CBRS. Las salidas incluyen el desmontaje selectivo optimizado, el estado de desmontaje final y los valores de los índices de desmontaje de las partes interesadas.

Satoglu y Bal proponen un modelo de programación por metas para la planificación de operaciones de logística inversa de WEEEs desde el cliente hasta las instalaciones de recuperación [53]. El objetivo del modelo es decidir la recolección de productos en cada región y cada período de tiempo. Se aplica sobre una empresa de refrigeradores de Turquía. La sustentabilidad se aborda en las dimensiones social (para garantizar la equidad en las condiciones de trabajo), ambiental (exceso de emisión de CO₂ por la logística y por la recuperación) y económica (minimización de costos). Destacan que no solo el costo de operación en la planta sino también el costo de transporte juegan un papel importante en la estructura de costos del proceso de reciclaje.

Los mismos autores publican un artículo donde estudian la misma problemática, esta vez incluyendo objetivos legales [54], involucrando expertos en los distintos temas. El modelo tiene una perspectiva multi-producto, multi-localidad y multi-período, y determina tiempos y cantidades de colección de desechos, considerando distintos parámetros como costo y ganancia de los productos, emisiones, capacidad en localidades, entre otros. Realizaron una aplicación del modelo para un productor de electrodomésticos, el cual resolvieron lexicográficamente utilizando GAMS con el solver CPLEX.

La selección de partes para desmontaje es otra sección abordada en la categoría de planificación de la producción. Kinoshita et al. estudiaron la selección de partes para desmontaje y reciclado con objetivos económicos y ambientales [33]. Para ello, realizaron un modelo de programación por metas, donde se elige qué partes se desmontarán y reciclarán. Los autores aplicaron el modelo en un caso práctico con celulares.

Kinoshita et al. [34] estudiaron la selección de partes para desmontaje teniendo como objetivos la minimización del costo de reciclaje y la maximización de ahorro en CO₂ o del ratio de reciclaje. Resolvieron dicho programa bi-objetivo con programación por metas, analizando luego los resultados en términos de peso y costo de cada material. De esta manera, buscaron identificar cuellos de botella en el procedimiento de desmontaje para proponer oportunidades de mejora. Tomaron el caso práctico de aspiradoras para validar y estudiar el modelo propuesto.

Dentro de la temática de planificación de la producción se encuentran también De Barba et al., quienes desarrollan un modelo para elegir entre un producto nuevo y uno remanufacturado, considerando la opinión del cliente en la toma de decisiones [10]. Se utiliza el método multicriterio Macbeth para utilizar indicadores de rendimiento en la evaluación comparativa pero también considerar los distintos puntos de vista de las partes interesadas. Además, Macbeth cuenta con una herramienta de análisis de sensibilidad que, a su vez, tiene como finalidad verificar los efectos de los parámetros de entrada sobre los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo. Este trabajo demuestra que aspectos económicos, ambientales y análisis técnicos no son suficientes para la elección de productos remanufacturados.

Ding et al. presentan una metodología multicriterio que facilita la toma de decisiones [12]. En particular, la misma se centra en la elección de un determinado tipo de carriles-guía de maquinaria (machine tool guideways). Proponen dos etapas para la resolución de dicho objetivo. En primer lugar, utilizando AHP determinan y ponderan los criterios con los cuales evaluar a cada alternativa. En la etapa siguiente, toman las ponderaciones de los criterios como insumo para rankear a los distintos carriles guía. CD TOPSIS (Connection degree TOPSIS) es la metodología que proponen para la etapa. Posteriormente, validan el método con un caso práctico, donde 8 carriles-guía son evaluados según 13 sub-criterios ponderados. Por último, comparan la metodología contra otras ya conocidas para verificar la consistencia del ranking.

Esta subcategoría de la temática estudiada contiene una serie de trabajos que no solo abarcan la planificación de la producción, sino que también tienen una componente de cadena de suministro. Kammoun et al. [30] presentan una cadena de suministro cerrada con remanufactura genérica y un modelo de programación por metas multi-producto y multi-período para decidir qué cantidad de piezas se procesarán y comprarán en cada punto de remanufactura, con opción de enviar a un tercero el exceso de piezas a procesar. El objetivo del modelo es minimizar tanto los costos de remanufactura como los de compras de partes nuevas. Los autores validan el modelo con un caso numérico utilizando el software CPLEX para resolverlo. Sin embargo, los autores concluyen que la solución no permite que el tomador de decisiones pueda interpretar económicamente los resultados.

Sarkar et al. desarrollaron un modelo multicriterio para una cadena de suministro cerrada de envases retornables a partir de polímeros auto-curativos [52]. Dicha cadena se compone de un único proveedor, un único fabricante y varios puntos de venta, cada uno con restricciones de presupuesto y capacidad. El modelo de programación por metas ponderado apunta a la maximización de ganancias y la minimización de emisiones de carbón del sistema, decidiendo sobre tiempos de ciclo, cantidades requeridas de envases y precios de venta. Fue resuelto utilizando tres algoritmos distintos (algoritmo de punto interior, algoritmo genético y optimización de enjambre de partículas) en un ejemplo numérico, realizando también un análisis de sensibilidad, variando las preferencias del tomador de decisiones. También estudiaron la ventaja de utilizar un modelo de cadena de suministro con una política de multi entregas en comparación con entregas únicas.

Su y Sun investigan una cadena de abastecimiento cerrada (CLSC), teniendo en cuenta logística inversa y directa, y la incertidumbre de la demanda [57]. Para ello, los autores proponen un modelo matemático multiobjetivo entero mixto. Éste busca maximizar ganancias y minimizar la contaminación ambiental. Se utiliza un algoritmo genético para su resolución, NSGA-II (nondominated sorting genetic algorithm II). Su solución indica cuántos productos nuevos y remanufacturados deben ser producidos y transportados, y cuántos productos reciclados deben atravesar la cadena para maximizar ganancias y minimizar costos ambientales. El modelo es aplicado a un sistema con 2 manufactureras, 3 centros de distribución y reciclaje y 4 tiendas, donde la demanda es simulada con distribución uniforme.

El último documento de esta subcategoría pertenece a Garside et al. [18]. Los autores desarrollaron un modelo de logística inversa para el reciclaje de botellas de plástico. El modelo fue propuesto para la empresa Bank Sampah Malang, donde se consideran costos, capacidades de depósitos, vehículos y desmontaje, la disponibilidad de botellas usadas y la demanda de plástico cortado. Lo resolvieron utilizando programación por metas lexicográficas con el software LINGO, lo cual indicó que se alcanzaron ambos objetivos propuestos en la línea de minimizar costos e impactos ambientales.

4.4. Revisión bibliográfica

En esta categoría se encuentran 3 de los 38 documentos obtenidos a partir de la búsqueda bibliográfica. Como se mencionó en la sección análisis, únicamente uno de ellos pertenece al tipo de documento conocido como revisión, mientras que los otros dos son artículos. Sin embargo, los tres fueron clasificados dentro de esta categoría debido a que sus contenidos comparan un conjunto de documentos que se publican en base a un tema específico.

En primer lugar, Ilgin et al. [23] presentan una revisión de 190 artículos publicados entre 1996 y 2014 sobre el uso de técnicas de toma de decisiones multicriterio en fabricación y recuperación de productos respetuosos con el medio ambiente. El contenido de este documento se presenta según las distintas categorías de las técnicas MCDM: técnicas de optimización multiobjetivo, técnicas de análisis multicriterio y la integración de ellos. Mientras que

las técnicas de optimización multiobjetivo buscan nuevas soluciones en el espacio de soluciones, las técnicas de análisis de criterios múltiples consideran un número limitado de alternativas y las clasifican según distintas preferencias. En la categoría de técnicas de optimización multiobjetivo se presentan distintos métodos, entre los más conocidos se encuentran programación física lineal y no lineal, programación por metas, programación física y distintas heurísticas y metaheurísticas. Por otro lado, entre las técnicas de análisis multicriterio se presentan proceso de jerarquía analítica, proceso de jerarquía analítica difusa, análisis envolvente de datos, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, entre otros. El documento concluye que el análisis multicriterio es más popular que la optimización multiobjetivo en la fabricación y recuperación de productos respetuosos con el medio ambiente. A su vez, se menciona que, debido a las consecuencias de ECMPRO (Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery), los estudios de la revisión consideran simultáneamente criterios económicos y ambientales.

Vedpal y Jain [61] presentan una revisión bibliográfica destacando las aplicaciones de modelado en la logística inversa de 32 documentos publicados entre 1995 y 2009. Entre ellos, se presenta los métodos de programación lineal, programación lineal de enteros mixtos, programación por metas y algoritmo genético. A su vez, también se clasifican los problemas de logística inversa en cinco categorías: distribución, planificación y control de la producción, tecnología de la información, economía empresarial e integración y coordinación.

Por otro lado, Zarte et al. [70] presentan una revisión de la literatura de 300 artículos cuyas fechas de publicación son entre 2007 y 2017. La revisión de la literatura se centra en las investigaciones que consideran las tres dimensiones de sostenibilidad (económica, ambiental, pero también social) y en las distintas decisiones en las fases del ciclo de vida del producto (selección de procesos y recursos sostenibles en el diseño, remanufactura sostenible de procesos y productos, planificación de la producción sostenible y evaluación sostenible de la producción y los productos). Los resultados muestran que las tomas de decisiones a nivel de planificación estratégica (diseño y remanufactura de productos y procesos) integran la sostenibilidad en las tres dimensiones (económica, ambiental y social), mientras que las decisiones operativas únicamente impulsan dimensiones económicas y ambientales. Durante esta revisión bibliográfica, se abordan dos desafíos principales: los métodos MCDM aplicables a la toma de decisiones sostenibles y la selección de indicadores de sostenibilidad. Se concluye que no existe un método específico para utilizar en la toma de decisiones para cada fase de la producción y ciclo de vida del producto. A su vez, se ha encontrado una tendencia sobre los distintos indicadores sostenibles para cada fase. Sin embargo, dado que la selección de indicadores es un proceso subjetivo, no es posible comparar los resultados de la toma de decisiones sin estándares y sistemas de gestión.

5. Discusión

A continuación se presenta, siguiendo la clasificación descrita en la Sección anal, una breve discusión de cada conjunto de documentos. Se destacan las principales coincidencias y discrepancias de los documentos agrupados. A su vez, se sugieren potenciales líneas de estudio a futuro.

5.1. Cadena de suministro

En primer lugar, nos encontramos con que en cada uno de los documentos se abordan distintas problemáticas utilizando la misma herramienta, Programación por Metas. De todas formas, en cada caso se utilizó para cumplir objetivos distintos. Asimismo, la recuperación de EOL es, al fin y al cabo, el eje central de todas las líneas de investigación recuperadas. A su vez, no siempre coincide la forma de recuperación de estos productos. Mientras algunos aspiran al reciclaje de estos, otros se limitan a la remanufacturación. A modo de presentar próximos pasos, se considera de interés profundizar en una única forma de recuperación de EOLs, y comparar las distintas metodologías utilizadas para integrar dicha recuperación a la cadena de suministro.

5.2. Decisiones estratégicas en la economía circular

A diferencia de la sección anterior, en este espacio nos encontramos con distintas metodologías multicriterio utilizadas en los documentos descritos. A su vez, varios autores optan por combinar más de un método para abordar a una problemática, siguiendo un procedimiento en varias etapas. Por otro lado, se presentan documentos en donde su riqueza viene dada por atacar un mismo problema con distintos métodos de resolución, comparando los resultados obtenidos en cada caso.

Por otro lado, independientemente de los métodos de resolución descritos en los documentos, la mayoría de estos se centran en la selección de estrategias sostenibles. Y en particular, en [22] se presenta un modelo productivo. Como investigación a futuro, sería relevante analizar los resultados obtenidos posterior a la implementación de dicho modelo, y comparar los beneficios reales con los hipotéticos presentes en el documento.

5.3. Planificación de la producción

Esta sección contiene una gran variedad de artículos de los cuales se desprenden ciertos puntos a resaltar. En primer lugar, el alcance de los documentos es muy variado, se puede observar como ciertos autores se enfocan en un alcance puntual, como es el de un único producto, mientras que otros abarcan la planificación multi-producto y multi-período. Es interesante ver también como en muchos de los casos, se estudia la planificación de la producción en conjunto con la planificación de la cadena de suministro, mostrando la fuerte relación que tienen ambas en la realidad.

Por otro lado, se pueden observar autores que estudiaron la temática en varias ocasiones. Esto habla, no solo de la complejidad del tema, sino de las variadas aristas por las cuales se puede atacar un mismo problema. Se observa cómo se atacan los mismos problemas pero con métodos de resolución distintos, o variantes distintas de un mismo método de resolución, como es la programación por metas.

Dentro de los criterios u objetivos estudiados en los documentos, se destaca la presencia de la minimización de costos o maximización de ganancias en la totalidad de los mismos. Sin embargo, se puede ver como el resto de los objetivos son variados. Algunos se enfocan únicamente en el impacto ambiental, mientras otros también abarcan impactos sociales o legales, intentando conseguir un enfoque sustentable.

La necesidad de información sobre el estado de retorno de los productos para la toma de decisiones es un punto que se repite en reiteradas ocasiones. La utilización de RFID es un ejemplo que se puede observar en varios de los documentos. Sin embargo, esta tecnología no está siempre disponible al momento de tomar las decisiones, haciendo que el estado de retorno de los productos sea un dato histórico. Una posible línea de estudio sería la combinación de los modelos multicriterio con modelos entrenados con aprendizaje automático sobre el estado de retorno de los productos.

5.4. Revisión bibliográfica

A partir de la revisión de los artículos asociados a la categoría de clasificación de revisión bibliográfica, es necesario mencionar ciertos resultados a destacar.

En primer lugar, la cantidad de artículos abordados en cada revisión bibliográfica es sumamente distinta. En primer lugar, Zarte et al. [70] hace la comparación de 300 artículos, mientras que Ilgin et al. [23] compara 190 y Vedpal y Jain [61] 32 artículos. A su vez, la organización del contenido es diferente en cada documento debido a que se analizan distintas cuestiones. Por un lado, Ilgin et al. [23] y Vedpal y Jain [61] organizan su contenido según los distintos métodos de resolución abarcados en cada artículo, mientras que Zarte et al. [70] escoge realizar la comparativa según las distintas decisiones en las fases del ciclo de vida del producto comprendidas en los documentos.

Por último, cabe mencionar que, mientras que Vedpal y Jain [61] y Ilgin et al. [23] realizan las investigaciones de artículos publicados entre los años 1995 y 2014, el análisis de Zarte et al. [70] contiene documentos publicados en fechas más recientes, contenidas entre los años 2007 y 2017.

Referencias

- [1] Y. A. Alamerew and D. Brissaud. Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. *Journal of Remanufacturing*, 9:169–185, 2019.
- [2] Y. A. Alamerew, M. L. Kambanou, T. Sakao, and D. Brissaud. A multi-criteria evaluation method of product-level circularity strategies. *Sustainability*, 12:1–19, 2020.
- [3] C. Bai, H. Ahmadi, M. Moktadir, S. Kusi-Sarpong, and J. Liou. Analyzing the interactions among the challenges to circular economy practices. *IEEE Access*, 9:63199 – 63212, 2021.
- [4] A. Banasik, J. Bloemhof-Ruwaard, A. Kanellopoulos, G. Claassen, and J. Van der Vorst. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30:1–31, 2018.
- [5] A. Banasik, J. M. Bloemhof-Ruwaard, A. Kanellopoulos, G. D. H. Claassen, and J. G. A. J. van der Vorst. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review. *Flexible Services Manufacturing Journal*, 30:366 – 396, 2018.
- [6] B. Beamon. Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12:332–342, 1999.
- [7] J. Branke, K. Deb, K. Miettinen, and S. Roman. Multiobjective optimization, interactive and evolutionary approaches [outcome of dagstuhl seminars]. pages 1–469, 2008.
- [8] A. Candia and M. González. Sistemas de ingeniería: problemas, modelos y algoritmos de solución para la ayuda en la toma de decisiones. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19:310 – 311, 2011.
- [9] J. D. Darbari, V. Agarwal, and P. C. Jha. A carbon sensitive multi echelon reverse logistics network design for product value recovery. In *Proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving*, pages 883–903, 2014.
- [10] D. J. De Barba, J. de Oliveira Gomes, J. I. Salis, and C. A. S. Bork. Remanufacturing versus manufacturing – analysis of requirements and constraints for a study case: Control arm of a suspension system. In *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, pages 669 – 673, 2013.
- [11] C. M. Defalque, A. F. da Silva, and F. A. Silva. Goal programming model applied to waste paper logistics processes. *Applied Mathematical Modelling*, 98:185–206, 2021.
- [12] Z. Ding, Z. Jiang, H. Zhang, W. Cai, and Y. Liu. An integrated decision-making method for selecting machine tool guideways considering remanufacturability. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33:686–700, 2020.
- [13] P. Dutta, A. Mishra, s. Khandelwal, and I. Katthawala. A multiobjective optimization model for sustainable reverse logistics in indian e-commerce market. *Journal of Cleaner Production*, 249:119–348, 2020.
- [14] S. Ellspermann, G. Evans, and M. Basadur. The impact of training on the formulation of ill-structured problems. *The International Journal of Management Science*, 35:221–236, 2005.
- [15] Á. S. Fernández Bou and J. C. Soares de Mello. Análisis del método ordinal de decisión multicriterio del veto. *INGENIARE - Revista Chilena de Ingeniería*, 23:556 – 568, 2015.
- [16] E. Forman and K. Peniwati. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 108(1):165–169, 1998.
- [17] A. Garcia. Recomendaciones tactivo-operativas para implementar un programa de logistica inversa: Estudio de caso en la industria de reciclaje. 2006.
- [18] A. K. Garside, B. U. Farida, and I. Masudin. A reverse logistics model for plastic bottle recycling in bank sampah malang. *Journal of Physics: Conference Series*.
- [19] B. Giri and B. Sarker. Improving performance by coordinating a supply chain with third party logistics outsourcing under production disruption. *Computers Industrial Engineering*, 103:168–177, 2017.
- [20] A. Gupta and G.W. Evans. A goal programming model for the operation of closed-loop supply chains. *Engineering Optimization*, 48:713–735, 2009.

- [21] N. A. Harraz and N. M. Galal. Design of sustainable end-of-life vehicle recovery network in egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 2:211–219, 2011.
- [22] A. Huang, K. Wijekoon, and F. Badurdeen. Goal programming-based approach to identify sustainable product service system designs”, booktitle=“leveraging technology for a sustainable world. pages 19–24, 2012.
- [23] M. Ilgin, S. Gupta, and O. Battaia. Use of mcdm techniques in environmentally conscious manufacturing and product recovery: State of the art. *Journal of Manufacturing Systems*, 37:746–758, 2015.
- [24] K. Jayakrishna and S. Vinodh. Application of grey relational analysis for material and end of life strategy selection with multiple criteria. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 8:250–272, 2017.
- [25] Z. Jiang, H. Zhang, and J. W. Sutherland. Development of multi-criteria decision making model for remanufacturing technology portfolio selection. *Journal of Cleaner Production*, 19:1939–1945, 2011.
- [26] D. Jones and M. Tamiz. *Practical Goal Programming*, volume 141. Springer, 1 edition, 2010.
- [27] A. D. Joshi and S. M. Gupta. Evaluation of design alternatives of sensors embedded air conditioners using linear physical programming. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, (icpr), 2017.
- [28] A. D. Joshi and S. M. Gupta. Evaluation of design alternatives of end-of-life products using internet of things. *International Journal of Production Economics*, 208:281–293, 2019.
- [29] A. D. Joshi and Gupta S. M. Analysis of design alternatives of end-of-life products under fractional yields. In *Handbook of Research on Supply Chain Management for Sustainable Development*, chapter 2, pages 18–41. 2018.
- [30] A. Kammoun, M. Benaissa, and H. Chabchoub. Planning model in reverse logistic. In *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport*, pages 446–451, 2013.
- [31] D. Kannan, A. Diabat, and K. Shankar. Analyzing the drivers of end-of-life tire management using interpretive structural modeling (ism). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72:1603 – 1614, 2014.
- [32] Kavita, S. P. Yadav, and S. Kumar. A multi-criteria interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with topsis method. In *Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing*, pages 303–312, 2009.
- [33] Y. Kinoshita, T. Yamada, S. M. Gupta, A. Ishigaki, and M. Inoue. Analysis of environmental and economic disassembly parts selection by goal programming. *Procedia CIRP*, 40:162–167, 2016.
- [34] Y. Kinoshita, T. Yamada, S. M. Gupta, A. Ishigaki, and M. Inoue. Analysis of cost effectiveness by material type for co2 saving and recycling rates in disassembly parts selection using goal programming. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 12:1–18, 2018.
- [35] M. Köksalan, J. Wallenius, and S. Zionts. *An Early History of Multiple Criteria Decision Making*, pages 3–17. 2016.
- [36] A. Kumar, B. Sah, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R.C. Bansal. A review of multi criteria decision making (mcdm) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:596–609, 2017.
- [37] W. Li, K. Xia, B. Lu, K. M. Chao, L. Gao, and J. X. Yang. *A Distributed Service of Selective Disassembly Planning for Waste Electrical and Electronic Equipment with Case Studies on Liquid Crystal Display*, pages 23 – 47. Springer London, 2013.
- [38] W. D. Li, K. Xia, L. Gao, and K. M. Chao. Selective disassembly planning for waste electrical and electronic equipment with case studies on liquid crystal displays. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29:248–260, 2013.
- [39] HC. Liu, LX. Mao, ZY. Zhang, and P. Li. Induced aggregation operators in the vikor method and its application in material selection. *Applied Mathematical Modelling*, 37:6325–6338, 2013.
- [40] J. Mateo. Multi criteria analysis in the renewable energy industry. pages 1–106, 2012.

- [41] L. Meade, J. Sarkis, and A. Presley. The theory and practice of reverse logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 3:56–84, 2007.
- [42] J. Mesa, A. González-Quiroga, and H. Maury. Developing an indicator for material selection based on durability and environmental footprint: A circular economy perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 160:104 – 887, 2020.
- [43] K. S. Moghaddam. Supplier selection and order allocation in closed-loop supply chain systems using hybrid monte carlo simulation and goal programming. *International Journal of Production Research*, 53:6320–6338, 2015.
- [44] M. Nikanorova and J. Stankevičienė. Development of environmental pillar in the context of circular economy assessment: Baltic sea region case. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 8:1209–1223, 2020.
- [45] O. Ondemir and S. Gupta. Quality management in product recovery using the internet of things: An optimization approach. *Computers in Industry*, 65:491–504, 2013.
- [46] O. Ondemir and S. M. Gupta. A multi-criteria decision making model for advanced repair-to-order and disassembly-to-order system. *European Journal of Operational Research*, 233:408–419, 2014.
- [47] S. Pazhani, N. Ramkumar, T.T. Narendran, and K. Ganesh. A bi-objective network design model for multi-period, multi-product closed-loop supply chain. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 30:264–280, 2013.
- [48] S.D. Pohekar and M. Ramachandran. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 8(4):365, 2004.
- [49] H. Polatidis, D. A. Haralambopoulos, G. Munda, and R. Vreeker. Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1:181–193, 2006.
- [50] D. Rogers and R. Tibben-Lembke. Going backwards: Reverse logistics trends and practices. *Reverse Logistics Executive Council*, 12:332–342, 1998.
- [51] C. Romero. *Análisis de las Decisiones Multicriterio*. Isdefe, 28006 Madrid, 1996.
- [52] B. Sarkar, M. Tayyab, N. Kim, and M. S. Habib. Optimal production delivery policies for supplier and manufacturer in a constrained closed-loop supply chain for returnable transport packaging through metaheuristic approach. *Computers Industrial Engineering*, 135:987–1003, 2019.
- [53] S. I. Satoglu and A. Bal. A goal programming model for the weee products recovery operations planning. *Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 2017.
- [54] S. I. Satoglu and A. Bal. A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production*, 201:1081–1091, 2018.
- [55] K. M. Shankar, D. Kannan, and P. U. Kumar. Analyzing sustainable manufacturing practices – a case study in indian context. *Journal of Cleaner Production*, 164:1332–1343, 2017.
- [56] X. Sheng, W. Yang, L. Chen, and H. Yang. Research on the choice of the third-party reverse logistics enterprise based on the method of ahp and goal programming. *Advanced Materials Research*, 452-453:581–585, 2012.
- [57] Y. Su and W. Sun. Analyzing a closed-loop supply chain considering environmental pollution using the nsga-ii. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 27:1066–1074, 2019.
- [58] Y. Sánchez, J. Pérez, N. Sangroni, C. Cruz, and Y. Medina. Retos actuales de la logística y la cadena de suministro. *Ingeniería Industrial*, 42:169 – 184, 2021.
- [59] T. Tsoutsos, M. Drandaki, N. Frantzeskaki, E. Iosifidis, and I. Kiosses. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of crete. *Energy Policy*, 37:1587–1600, 2009.
- [60] S. Vadde, A. Zeid, and S. V. Kamarthi. Pricing decisions in a multi-criteria setting for product recovery facilities. *Omega*, 39:186–193, 2011.

- [61] A. Vedpal and J. Vipul. A conceptual framework for modeling reverse logistics networks. *International Journal of Intelligent Enterprise*, 3:353–363, 2011.
- [62] H. Verfaillie and R. Bidwell. Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance. *Conches-Geneva : World Business Council for Sustainable Development*, pages 1–39, 2000.
- [63] J. Wallenius, J. S. Dyer, P. C. Fishburn, R. E. Steuer, S. Zionts, and K. Deb. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead. *Management Science*, 54:1336–1349, 2008.
- [64] F. Wang, X. Lai, and N. Shi. A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51:262–269, 2011.
- [65] J. Wang, C. Cheng, and H. Kun-Cheng. Fuzzy hierarchical topsis for supplier selection. *Applied Soft Computing*, 9:377–386, 2008.
- [66] A. Xanthopoulos and E. Iakovou. On the optimal design of the disassembly and recovery processes. *Waste management*, 29:1702–1711, 2008.
- [67] K. Xia, L. Gao, W. Li, L. Wang, and K. M. Chao. A q-learning based selective disassembly planning service in the cloud based remanufacturing system for weee. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2014.
- [68] A. Yayla, A. Oztekin, A. Gumus, and A. Gunasekaran. A hybrid data analytic methodology for 3pl transportation provider evaluation using fuzzy multi-criteria decision making. *International Journal of Production Research*, 53:6097–6113, 2015.
- [69] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.
- [70] M. Zarte, A. Pechmann, and I. Nunes. Decision support systems for sustainable manufacturing surrounding the product and production life cycle – a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 219:336–349, 2019.
- [71] H. Zhang, C. L. Gu, L. W. Gu, and Y. Zhang. The evaluation of tourism destination competitiveness by TOPSIS information entropy – a case in the yangtze river delta of china. *Tourism Management*, 32:443–451, 2011.

Anexo 2: Validación de los modelos

En la presente Sección, se describirán los distintos casos de prueba utilizados en las validaciones de cada modelo. Estos se presentarán en subsecciones por modelo.

Cada caso se presentará con una breve descripción de lo que se quería probar, y la salida esperada. A su vez, se incluyen las tablas de parámetros de entrada y resultados de las variables correspondientes. Como comentario general, los valores nulos de parámetros o variables, se indicarán en las tablas con los subíndices correspondientes de la forma *)

Modelo sin opción de retorno: planificación de la producción

En la presente Sección se muestran los distintos casos de prueba que formaron parte de la validación del modelo directo productivo. Estos comparten las siguientes condiciones generales en sus conjuntos y parámetros, los cuales se detallan en el siguiente punteo:

- Tres períodos de tiempo.
- Dos productos en la línea de producción animal.
- Un producto en la línea de producción vegetal.

Caso 2: Inexistencia de demanda

En este caso, los datos insertados al modelo corresponden a un pronóstico de demanda - simbolizado con la letra d - igual a cero. Esto significa que no hay necesidad de producir ninguno de los productos en ninguna de las líneas. Por ende, se espera que la variable de decisión correspondiente a cuánto producir de cada producto en cada período tenga valor nulo, y que la variable binaria indicadora de si se produce determinado producto en determinado período también valga cero.

En efecto, las variables toman los valores esperados.

Demanda pronosticada del producto p	d_1	0
	d_2	0
	d_3	0
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	1
	Q_2^{na}	5
	Q_3^{na}	4
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	1
	Q_2^{nv}	5
	Q_3^{nv}	4

Tabla 58: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 2.

Cantidad a producir de cada producto p por período t	x_{11}	0
	x_{12}	0
	x_{13}	0
	x_{21}	0
	x_{22}	0
	x_{23}	0
	x_{31}	0
	x_{32}	0
	x_{33}	0
Variable binaria de producción de cada producto p por período t	z_{11}	0
	z_{12}	0
	z_{13}	0
	z_{21}	0
	z_{22}	0
	z_{23}	0
	z_{31}	0
	z_{32}	0
	z_{33}	0

Tabla 59: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultado de las variables - Caso 2.

Caso 3: Exceso de demanda

En esta oportunidad se valida que no exista una solución factible cuando la capacidad de producción de cada línea es inferior a la cantidad total que debe producirse en cada una de ellas. Para ello, se le dió un valor d al producto 1, contemplando que satisfacer este valor en su línea excede a la capacidad total disponible en el horizonte temporal. Como consecuencia, el modelo devolvió que no existe una solución factible.

Demanda pronosticada	d_1	11
	d_2	0
	d_3	0
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	1
	Q_2^{na}	5
	Q_3^{na}	4
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	1
	Q_2^{nv}	5
	Q_3^{nv}	4

Tabla 60: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 3.

NO FEASIBLE SOLUTION

Tabla 61: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 3.

Caso 4: Demanda sobre una única línea

Para verificar que se produzcan los productos únicamente en la línea que les corresponda, se optó por indicar valores positivos de d para la línea de nutrición animal, dejando al producto número 3 de la línea vegetal con demanda nula. Con esto, el sistema devolvió que las variables binarias de la línea sin demanda se mantengan en cero, y asimismo la variable indicadora de cantidad a producir de los productos

de la línea vegetal, inactiva. Por otro lado, los productos de la línea animal con demanda cuentan con las cantidades a producir esperadas.

Demanda pronosticada	d_1	5
	d_2	5
	d_3	0
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	1
	Q_2^{na}	5
	Q_3^{na}	4
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	1
	Q_2^{nv}	5
	Q_3^{nv}	4

Tabla 62: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 4.

Cantidad a producir de cada producto por período	x_{11}	1
	x_{13}	4
	x_{22}	5
	x_{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	z_{11}	1
	z_{13}	1
	z_{22}	1
	z_{**}	0

Tabla 63: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 4.

Caso 5: Alta demanda de producto con costo de setup

Para verificar que se tomen en cuenta los costos de set up, se asignó un costo de set up alto a un único producto, y a su vez su demanda pronosticada podría llegar a satisfacerse por completo en un único período. Se espera que la solución arrojada concentre la producción de este producto (en el escenario, el número 2) en la menor cantidad de períodos posibles (en este caso, en el tercero), teniendo en cuenta la capacidad de la línea correspondiente. En efecto, se cumplió con las expectativas.

Demanda pronosticada	d_1	10
	d_2	10
	d_3	10
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	5
	Q_2^{na}	5
	Q_3^{na}	10
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	5
	Q_2^{nv}	5
	Q_3^{nv}	5
Costo de setup de cada producto	k_1^{nv}	3
	k_2^{nv}	300
	k_3^{nv}	3

Tabla 64: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 5.

Cantidad a producir de cada producto por período	x_{11}	5
	x_{12}	5
	x_{23}	10
	x_{31}	5
	x_{32}	5
	x_{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	z_{11}	1
	z_{12}	1
	z_{23}	1
	z_{31}	1
	z_{32}	1
	z_{**}	0

Tabla 65: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 5.

Caso 6: Concentración de demanda en un único producto

En este caso genérico, se concentra la demanda pronosticada en un único producto, pero en cantidades significativas. Se espera que, con esto, se produzca lo correspondiente a satisfacer esa demanda, respetando la capacidad de producción por período de la línea afectada. La solución devuelta por el sistema se acompaña con lo esperado.

Demanda pronosticada	d_1	0
	d_2	1000
	d_3	0
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	1000
	Q_2^{na}	5000
	Q_3^{na}	4000
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	1000
	Q_2^{nv}	5000
	Q_3^{nv}	4000

Tabla 66: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 6.

Variables		
Cantidad a producir de cada producto por período	x_{21}	1000
	x_{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	z_{21}	1
	z_{**}	0

Tabla 67: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 6.

Caso 7: Demanda pronosticada positiva en todos los productos

Siguiendo con el razonamiento del caso anterior, lo que se busca en esta validación es verificar que la producción se corresponda con la demanda por producto ingresada. Para este nuevo escenario, se indican demandas positivas en todos los productos, sin hacer énfasis en las altas cantidades demandadas por producto. De todas formas, la solución devuelta respeta la condición de que la suma de dichas demandas sea satisfecha por la producción, respetando las capacidades de cada línea.

Demanda pronosticada	d_1	10
	d_2	10
	d_3	20
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	10
	Q_2^{na}	50
	Q_3^{na}	40
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	10
	Q_2^{nv}	50
	Q_3^{nv}	40

Tabla 68: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 7.

Cantidad a producir de cada producto por período	x_{11}	0
	x_{12}	10
	x_{13}	0
	x_{21}	0
	x_{22}	10
	x_{23}	0
	x_{31}	0
	x_{32}	0
	x_{33}	20
Variable binaria de producción de cada producto por período	z_{12}	1
	z_{22}	1
	z_{33}	1
	z_{**}	0

Tabla 69: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 7.

Caso 8: Datos genéricos en productos cualesquiera

Para el último escenario de validación del modelo de planificación de la producción, se indicaron demandas sobre productos cualesquiera, en ambas líneas, buscando que se respeten las capacidades de la líneas y que se satisfaga toda demanda pronosticada con la producción sobre cada línea. El resultado demuestra que las variables binarias se activan para hacerlo, y las cantidades producidas de cada producto se corresponden con cada demanda.

Demanda pronosticada	d_1	30
	d_2	10
	d_3	50
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	100
	Q_2^{na}	50
	Q_3^{na}	4
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	70
	Q_2^{nv}	5
	Q_3^{nv}	45

Tabla 70: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 8.

Cantidad a producir de cada producto por período	X ₁₁	30
	X ₂₁	10
	X ₃₁	50
	X _{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	Z ₁₁	1
	Z ₂₁	1
	Z ₃₁	1
	Z _{**}	0

Tabla 71: Planificación de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 8.

Modelo sin opción de retorno: Distribución de la producción

Esta Sección presenta trece escenarios de prueba para validar el correcto funcionamiento del modelo logístico de distribución de la producción. En este caso, los parámetros generales sobre los que se presentan los casos de prueba son los siguientes:

- Tres períodos de tiempo.
- Cinco clientes.
- Un camión propio.
- Tres camiones tercerizados.
- Dos camiones de agencia.
- El cliente más alejado que puede ser alcanzado por el camión propio es el 3.
- El camión propio puede visitar hasta a dos clientes por período.
- Cada unidad de producto equivale a una unidad másica y a una unidad volumétrica.

Caso 4: Inventario insuficiente para satisfacer la demanda

En este caso se ingresan valores de demanda por cliente, producto y período, los cuales no pueden ser satisfechos con el nivel de inventario inicial. Se optó por indicar únicamente demanda positiva para el cliente 2, del producto 1, en el período 1. Con esto, se espera que no exista una solución factible arrojada por el modelo, y se cumplió con la expectativa.

Demanda	d_{211}	50
	d_{***}	0
Inventario inicial del producto 1	I_1	20

Tabla 72: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 4.

NO FEASIBLE SOLUTION

Tabla 73: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 4.

Caso 5: Capacidad de traslado insuficiente para satisfacer la demanda

De forma análoga al caso anterior, se espera que no exista una solución factible cuando la demanda ingresada supera la capacidad del transporte en su totalidad, considerando todos los períodos, y todos los camiones de cada modalidad. Efectivamente, el resultado concuerda con lo esperado.

Demanda	d_{421}	40
	d_{***}	0
Capacidad volumétrica del camión propio	Q_{vpv}	1
Capacidad másica del camión propio	Q_{vpm}	1
Capacidad volumétrica de un camión de agencia	Q_{vav}	1
Capacidad másica de un camión de agencia	Q_{vam}	1
Capacidad volumétrica de un camión tercerizado	Q_{vtv}	1
Capacidad másica de un camión tercerizado	Q_{vtm}	1

Tabla 74: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 5.

NO FEASIBLE SOLUTION

Tabla 75: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 5.

Caso 6: Elevados costos fijos

El objetivo de este escenario es validar el objetivo del modelo, el cual implica minimizar los costos totales. Para ello, se ingresaron al sistema distintas tarifas asociadas al cliente que se vaya a visitar. Estas varían entre los distintos camiones, y en este caso se mantuvo invariante la tarifa asociada a la cantidad de producto que se envía. La salida esperada consiste en utilizar aquellos camiones que cuenten con las tarifas más bajas, y por ende signifiquen un costo global menor. El resultado coincide con las expectativas, ya que se viaja con un camión de agencia, y es la alternativa más económica en ese contexto.

Demanda	d_{211}	20
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vp2}	20
	c_{vpn}^*	0
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	5
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	0.5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	20
	c_{vtvn}^*	0
Capacidades volumétricas y máxicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	1000
	Q_{vpm}	1000
	Q_{vav}	1000
	Q_{vam}	1000
	Q_{vtv}	1000
	Q_{vtm}	1000

Tabla 76: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 6.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{2ai21}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	W_{12ai21}	20
	W_{****}	0

Tabla 77: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 6.

Caso 7: Elevados costos variables

Si bien el objetivo de este caso es validar que la solución toma los menores costos globales, como en el escenario anterior, las tarifas asociadas a visitar cada cliente con cada camión se mantuvieron invariantes. Por otro lado, sí se afectaron las tarifas asociadas a la cantidad de producto que se traslade. Nuevamente, la salida esperada consiste en utilizar los camiones que impliquen el menor costo posible. Dicho objetivo fue cumplido.

Demanda	d_{211}	20
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vp2}	10
	c_{vpn}^*	0
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	0.5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	10
	c_{vtvx}^*	0
Capacidades volumétricas y máxicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	1000
	Q_{vpm}	1000
	Q_{vav}	1000
	Q_{vam}	1000
	Q_{vtv}	1000
	Q_{vtm}	1000

Tabla 78: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 7.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	z_{2p1}	1
	z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{12p1}	20
	w_{****}	0

Tabla 79: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 7.

Caso 8: Inexistencia de demanda

Este escenario verifica que no se realicen visitas a clientes a no ser que exista una demanda a satisfacer con ese cliente. Esto se debe a que las visitas implican costos, y lo que se busca, en suma, es minimizar los costos globales. En este caso particular, se ingresaron demandas nulas para todos los clientes, en todos los períodos, y de todos los productos. Por ende, el modelo devolvió como solución no realizar ninguna visita con ninguno de los camiones, lo cual es correcto.

Demanda	d_{***}	0
---------	-----------	---

Tabla 80: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 8.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{****}	0

Tabla 81: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 8.

Caso 9: Exceso de demanda sobre la capacidad de traslado de un período

El conjunto de datos ingresados busca validar el correcto comportamiento de los camiones. En particular, se ingresan valores de demanda de productos del cliente 2 que, en suma, sobrepasan la capacidad del mayor de los camiones en un período. Esto implica que la demanda deba satisfacerse tanto con visitas de múltiples camiones en un mismo período, o con la visita del mismo camión en reiterados períodos. Además, la solución esperada debe contemplar obtener los menores costos totales. El comportamiento fue el esperado.

Demanda	d_{211}	40
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vp2}	20
	c_{vpn}^*	0
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	0.5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	10
	c_{vtv3}	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	10
	cf_2	14
	cf_3	19
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpp}	20
	Q_{vpm}	20
	Q_{vav}	20
	Q_{vam}	20
	Q_{vtv}	20
	Q_{vtm}	20

Tabla 82: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 9.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	z_{2t11}	1
	z_{2t22}	1
	z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{12t11}	20
	w_{12t22}	20
	w_{****}	0

Tabla 83: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 9.

Caso 10: Multiplicidad de viajes del camión propio

Se plantea que el camión propio puede visitar a determinados clientes dos veces por período. Los datos ingresados en este caso obligan a que el camión propio deba realizar múltiples visitas a distintos clientes, en este caso al 2 y al 3, para satisfacer sus demandas en un mismo período de tiempo. La solución determina que el camión propio los visita en un mismo período, lo cual coincide con lo esperado.

Demanda	d_{211}	10
	$d_3 * 1 * 1^*$	10
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vpn}^*	10
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	50
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	50
	c_{vtvn}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	50
	cf_2	50
	cf_3	50
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	20
	Q_{vpm}	20
	Q_{**}	0

Tabla 84: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 10.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{2p1}	1
	Z_{3p1}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{12p1}	10
	w_{13p1}	10
	w_{****}	0

Tabla 85: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 10.

Caso 11: Recorrido del camión propio

Se verifica con esta validación que el camión propio no visite a aquellos clientes que se encuentren fuera de su alcance. Para ello se ingresó demanda de productos de clientes que no deberían ser visitados por el camión propio, teniendo en cuenta al parámetro $Nmin$. La solución cumple con las expectativas.

Demanda	d_{111}	40
	d_{411}	20
	d_{511}	20
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vpn}^*	10
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	50
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	0.5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	50
	c_{vtvn}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	50
	cf_2	50
	cf_3	50
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpp}	40
	Q_{vpm}	40
	Q_{vav}	40
	Q_{vam}	40
	Q_{vtv}	0
	Q_{vtm}	0
Cota inferior de clientes que no puede visitar el camión propio	N^{min}	4

Tabla 86: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 11.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{1p1}	1
	Z_{4a11}	1
	Z_{5a21}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	W_{11p1}	40
	W_{14a11}	20
	W_{15a21}	20
	W_{****}	0

Tabla 87: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 11.

Caso 12: Exceso de demanda de un cliente

Se ingresa como dato la demanda de producto de un determinado cliente, que supera a la suma de capacidades de todos los transportes disponibles, en todos los periodos disponibles. Se espera que no exista una solución factible, ya que dicha necesidad no puede ser satisfecha. El resultado coincide con la expectativa.

Demanda	d_{211}	50
	d_{***}	0
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpp}	1
	Q_{vpm}	1
	Q_{vav}	1
	Q_{vam}	1
	Q_{vtv}	1
	Q_{vtm}	1

Tabla 88: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 12.

NO FEASIBLE SOLUTION

Tabla 89: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 12.

Caso 13: Satisfacción de la demanda únicamente con el camión propio

En este escenario se obliga a que el abastecimiento de producto a un determinado cliente se realice con el camión propio, tanto con múltiples viajes en un mismo período, o con múltiples viajes en varios pedidos. Para ello, se indicó una demanda mayor a la capacidad total de traslado por visita. La solución devuelta por el modelo verifica que se visitará en múltiples períodos para enviar todo lo necesario.

Demanda	d_{211}	50
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vpn}^*	10
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	50
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	0.5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	50
	c_{vtvn}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	50
	cf_2	50
	cf_3	50
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpp}	25
	Q_{vpm}	25
	Q_{**}	0

Tabla 90: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 13.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	z_{2p1}	1
	z_{2p2}	1
	z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{12p1}	25
	w_{12p2}	25
	w_{****}	0

Tabla 91: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 13.

Caso 14: División del pedido en múltiples períodos

Con el presente conjunto de datos se busca validar que se satisfaga la demanda de un cliente en múltiples períodos. Para ello, los datos ingresados implican que la suma de la capacidad de todos los camiones en un período, sea menor a la demanda de producto de ese cliente. La solución arrojada muestra como el cliente es visitado en mas de un período para satisfacer su necesidad.

Demanda	d_{411}	30
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vp1}	10
	c_{vp2}	10
	c_{vp3}	30
	c_{vp4}	40
	c_{vp5}	60
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	10
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	20
	c_{vtvn}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	10
	cf_2	14
	cf_3	19
Capacidades volumétricas y máxicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	10
	Q_{vpm}	10
	Q_{vav}	10
	Q_{vam}	10
	Q_{vtv}	0
	Q_{vtm}	0

Tabla 92: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 14.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{4a11}	1
	Z_{4a21}	1
	Z_{4a22}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	W_{14a11}	10
	W_{14a21}	10
	W_{14a22}	10
	W_{****}	0

Tabla 93: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 14.

Caso 15: Preferencia de visita en el período vs. backlog

El objetivo del caso es validar que la solución arrojada por el modelo contemple la opción con menor costo global. En particular, se valida que se prefiera visitar a un cliente en el período que hay demanda, cuando el costo de visitar es menor al costo de backlog (es decir, retrasar la entrega en al menos un período es la alternativa más cara). Para contemplarlo, se ingresaron tarifas asociadas a camiones menores a la tarifa de backlog del producto demandado. La solución devuelta opta por satisfacer la demanda en el período que se recibe, lo cual concuerda con la expectativa.

Demanda	d_{211}	20
	d_{411}	20
	d_{421}	10
	d_{412}	20
	d_{422}	10
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vpx*}	15
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	0.5
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vrv1}	20
	c_{vrv2}	20
	c_{vrv3}	30
	c_{vrv4}	30
	c_{vrv5}	30
Costo de backlog del producto p	cf_1	100
	cf_2	140
	cf_3	190
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	10
	Q_{vpm}	10
	Q_{vav}	10
	Q_{vam}	10
	Q_{vrv}	10
	Q_{vrm}	10

Tabla 94: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 15.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{4a11}	1
	Z_{4a21}	1
	Z_{2p1}	1
	Z_{2t11}	1
	Z_{4t21}	1
	Z_{4a12}	1
	Z_{4a22}	1
	Z_{4t12}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	W_{14a11}	10
	W_{14a21}	10
	W_{12p1}	10
	W_{12t11}	10
	W_{14a12}	10
	W_{14t12}	10
	W_{24t21}	10
	W_{24a12}	10
	W_{****}	0
Cantidad de producto p entregados en exceso al cliente n en el período t	b_{p*n*t}^1	0
Cantidad de producto p con retraso de entrega al cliente n en el período t	b_{p*n*t}^2	0

Tabla 95: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 15.

Caso 16: Preferencia de backlog vs. visita en el período

El objetivo del caso es idéntico al anterior: validar que la solución devuelta por el modelo contenga los menores costos globales. En esta oportunidad, se indica un costo de backlog por producto inferior al costo de visita. Es esperable que la solución arrojada por el modelo prefiera mantener un costo de backlog, postergando la visita del cliente para un período posterior, a modo de abaratar gastos. Dicha expectativa fue validada.

Demanda	d_{211}	50
	d_{212}	9
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente con el camión propio	c_{vp*}	15
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	100
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	20
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtvx}^*	10
Costo de backlog del producto p	cf_1	1
	cf_2	1
	cf_3	1
Capacidades volumétricas y máxicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	10
	Q_{vpm}	10
	Q_{vav}	10
	Q_{vam}	10
	Q_{vtv}	10
	Q_{vtm}	10

Tabla 96: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 16.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{2p1}	1
	Z_{2t11}	1
	Z_{2t21}	1
	Z_{2t31}	1
	Z_{2p2}	1
	Z_{2p3}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{12p1}	10
	w_{12t11}	9
	w_{12t21}	10
	w_{12t31}	10
	w_{12p2}	10
	w_{12p3}	10
	w_{****}	0
Cantidad de producto p entregados en exceso al cliente n en el período t	b_{p*n*t}^1	0
Cantidad de producto p entregados en exceso al cliente n en el período t	b_{121}^2	11
	b_{122}^2	10
	b_{p*n*t}^2	0

Tabla 97: Distribución de la producción sin opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 16.

Modelo con opción de retorno: Planificación de la producción

En esta Sección se presentan los casos de validación que se utilizaron sobre el modelo productivo inverso. Cabe destacar que, además de los listados a continuación, también se verificaron los casos de la Sección 11 correspondiente al Modelo de producción sin recuperación. En este sentido, estos nuevos casos apuntan a la utilización de los envases recuperados en el proceso de producción.

Por otro lado, si bien el modelo consta de más de una función objetivo, los casos se prueban verificando únicamente la función de costos. Esto se debe a que las otras funciones son crecientes en las variables x y r , y por ende, no existen mayores determinaciones.

Por último, se mantienen como invariantes las siguientes condiciones de conjuntos y parámetros:

- Dos líneas de producción.
- Dos productos en la línea de nutrición animal, y un producto en la línea de producción vegetal.
- Tres períodos.

Caso 2: Verificación de función de costos

En este caso se valida que los costos mínimos obtenidos en la función objetivo correspondan efectivamente a la producción más económica. Esto significa producir en cantidades iguales a la demanda pronosticada, y priorizando la utilización de los envases con tarifa más económica. La solución devuelta por el modelo coincide con lo esperado.

Demanda pronosticada	d_{p1}	60
	d_{p2}	34
	d_{p3}	25
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	10
	Q_2^{na}	50
	Q_3^{na}	40
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	10
	Q_2^{nv}	50
	Q_3^{nv}	40
Costo de un envase nuevo por producto	cn_1	5
	cn_2	5
	cn_3	5
Costo de un envase reutilizado por línea de producto	c_{rna}	10
	c_{rnv}	10
Stock de envases recuperados disponibles	S_{p1}	100
	S_{p2}	100
	S_{p3}	100

Tabla 98: Planificación de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 2.

Cantidad a producir de cada producto por período con envases nuevos	x_{11}	10
	x_{12}	50
	x_{23}	34
	x_{33}	25
	x_{**}	0
Cantidad a producir de cada producto por período con envases recuperados	r_{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	z_{11}	1
	z_{12}	1
	z_{23}	1
	z_{33}	1
	z_{**}	0

Tabla 99: Planificación de la producción con opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 2.

Caso 3: Producción al menor costo de envasado

En este caso se quiere evaluar que se consuma la mayor cantidad de envases recuperados para satisfacer a la demanda. Esto se debe a que se le asocia al envase recuperado una tarifa menor al envase nuevo. Además, el stock de envases recuperados supera a los necesarios para satisfacer a la demanda. Por tanto, se espera que se produzcan productos únicamente bajo la variable r , correspondiente a productos de envases recuperados, y que la variable x se mantenga en cero, ya que esta última corresponde a productos con envases nuevos. Los resultados obtenidos cumplen con las expectativas.

Demanda pronosticada	d_{p1}	60
	d_{p2}	34
	d_{p3}	25
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	10
	Q_2^{na}	50
	Q_3^{na}	40
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	10
	Q_2^{nv}	50
	Q_3^{nv}	40
Costo de un envase nuevo por producto	cn_1	60
	cn_2	36
	cn_3	25
Costo de un envase reutilizado por línea de producto	c_{rna}	10
	c_{rnv}	10
Stock de envases recuperados disponibles	S_{p1}	100
	S_{p2}	100
	S_{p3}	100

Tabla 100: Planificación de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 3.

Cantidad a producir de cada producto por período con envases nuevos	x_{**}	0
Cantidad a producir de cada producto por período con envases recuperados	r_{11}	10
	r_{12}	50
	r_{23}	34
	r_{33}	25
	r_{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	z_{11}	1
	z_{12}	1
	z_{23}	1
	z_{33}	1
	z_{**}	0

Tabla 101: Planificación de la producción con opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 3.

Caso 4: Utilización total de envases recuperados

El último caso presentado comparte el objetivo del caso anterior. Sin embargo, se agrega a los datos de entrada que el stock de envases recuperados es insuficiente para satisfacer a la demanda de producto en su totalidad. Con ello se obliga al modelo a satisfacer el resto de la demanda con insumos mas caros, es decir con envases nuevos, y representado con la variable x positiva. En efecto, la solución óptima obtenida implica utilizar el total de envases recuperados, y continuar la producción con los envases nuevos.

Demanda pronosticada	d_{p1}	60
	d_{p2}	34
	d_{p3}	25
Capacidad de línea de nutrición animal por período	Q_1^{na}	10
	Q_2^{na}	50
	Q_3^{na}	40
Capacidad de línea de nutrición vegetal por período	Q_1^{nv}	10
	Q_2^{nv}	50
	Q_3^{nv}	40
Costo de un envase nuevo por producto	cn_1	60
	cn_2	36
	cn_3	25
Costo de un envase reutilizado por línea de producto	c_{rna}	10
	c_{rnv}	10
Stock de envases recuperados disponibles	S_{p1}	50
	S_{p2}	30
	S_{p3}	20

Tabla 102: Planificación de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 4.

Cantidad a producir de cada producto por período con envases nuevos	x ₁₂	10
	x ₂₃	4
	x ₃₂	5
	x _{**}	10
Cantidad a producir de cada producto por período con envases recuperados	r ₁₁	10
	r ₁₂	40
	r ₂₃	30
	r ₃₂	20
	r _{**}	0
Variable binaria de producción de cada producto por período	z ₁₁	1
	z ₁₂	1
	z ₂₃	1
	z ₃₂	1
	z _{**}	0

Tabla 103: Planificación de la producción con opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 4.

Modelo con opción de retorno: Distribución de la producción

Las validaciones realizadas sobre el modelo logístico inverso incluyen las ya presentadas en el Anexo 11, correspondiente al Modelo logístico directo, y se agregan los casos listados a continuación.

Además de la descripción de cada caso, se debe considerar que en todos se verifica que la demanda se satisfaga únicamente con transporte definido como de ida, y que los envases sean devueltos con transporte definido como de vuelta. Además, se verifica que la cantidad de envases devueltos sea siempre mayor o igual al porcentaje mínimo de envases disponibles para su recuperación.

Por último, se mantienen como invariantes las siguientes condiciones de conjuntos y parámetros sobre cada escenario de validación:

- Cinco clientes.
- Tres tipos de productos.
- Tres tipos de envases (uno por cada producto).
- Tres períodos.
- Un camión propio para realizar viajes de ida y de vuelta.
- Tres camiones tercerizados disponibles para viajes de ida.
- Tres camiones tercerizados disponibles para viajes de vuelta.
- Dos camiones de agencia disponibles para viajes de ida.
- Dos camiones de agencia disponibles para viajes de vuelta.
- El cliente más alejado que puede ser alcanzado por el camión propio es el 3.
- El camión propio puede visitar hasta a dos clientes por período.
- Cada unidad de producto equivale a una unidad másica y a una unidad volumétrica.

Caso 3: Inexistencia de envases a recuperar

En este escenario se ingresó como dato que no existen envases disponibles para su recuperación. Por ende, se espera que tanto las variables binarias indicadoras de los traslados de vuelta se mantengan en cero, al igual que la variable asociada a la cantidad de envases a recoger por cada cliente. La salida fue acorde a lo esperado.

Demanda	d_{211}	50
	d_{322}	40
	d_{533}	10
	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente n con el camión propio	c_{vp1}	10
	c_{vp2}	10
	c_{vp3}	30
	c_{vp4}	40
	c_{vp5}	60
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	10
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	20
	c_{vtvx}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	10
	cf_2	14
	cf_3	19
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	1000
	Q_{vpm}	1000
	Q_{vav}	1000
	Q_{vam}	1000
	Q_{vtv}	1000
	Q_{vtm}	1000
Stock de cada envase en cada cliente	s_{**}	0
Porcentaje de envases a recuperar sobre el stock de disponibles en los clientes	a	0.04

Tabla 104: Distribución de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 3.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{2p1}	1
	Z_{3ti32}	1
	Z_{5ti11}	1
	Z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{21p1}	50
	w_{32ti32}	40
	w_{53ti11}	10
	w_{****}	0
Cantidad de envases e recuperados del cliente n con el camión v en el período t	r_{****}	0

Tabla 105: Distribución de la producción con opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 3.

Caso 4: Insuficiente capacidad de traslado de retorno

El objetivo de la validación es confirmar que el sistema no encuentra una solución factible cuando la cantidad de envases mínima que debe recuperarse supera la capacidad de traslado. Para ello, fue necesario ingresar capacidades de camiones disponibles para realizar viajes de vuelta, considerando que la suma de dichas capacidades en todos los períodos y camiones era menor a la cantidad mínima de envases a recuperar. En efecto, el solver indicó que no existe una solución factible para el planteo.

Demanda	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente n con el camión propio	c_{vp1}	10
	c_{vp2}	10
	c_{vp3}	30
	c_{vp4}	40
	c_{vp5}	60
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	10
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	20
	c_{vtvn}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	10
	cf_2	14
	cf_3	19
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpp}	10
	Q_{vpm}	10
	Q_{vav}	0
	Q_{vam}	0
	Q_{vtv}	0
	Q_{vtm}	0
Stock de cada envase en cada cliente	s_{12}	10
	s_{31}	10
	s_{420}	20
	s_{**}	0
Porcentaje de envases a recuperar sobre el stock de disponibles en los clientes	a	1

Tabla 106: Distribución de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 4.

NO FEASIBLE SOLUTION

Tabla 107: Distribución de la producción con opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 4.

Caso 5: Múltiples visitas para recuperar envases de un cliente

Para validar lo titulado en el caso, se debió obligar a que la capacidad de traslado del transporte más capaz, sea menor a la cantidad de envases que deben recuperarse de determinado cliente. Dicha cantidad que debe recuperarse se corresponde con cumplir con el porcentaje mínimo establecido. Se espera que el modelo devuelva la solución más barata. Dependiendo de los datos, esto puede asociarse a que se realicen varias visitas de distintos transportes en un mismo período, o bien que el/los traslado/s cubra/n la devolución haciendo visitas al cliente en distintos períodos. Es importante destacar que, si bien en los envases no existe una tarifa de backlog asociada, y no se cobran los 'retrasos' en la recuperación, puede ser una opción mas barata distribuir los viajes en períodos para aprovechar una vuelta de camión propio. Esto sucedería en el caso que este deba necesariamente acudir al cliente a abastacerlo con producto en un viaje de ida.

Según los datos ingresados, el modelo arrojó como solución con los costos globales más bsjos, y por ende cumplió con lo esperado.

Demanda	d_{***}	0
Costo de visitar al cliente n con el camión propio	c_{vp1}	10
	c_{vp2}	10
	c_{vp3}	30
	c_{vp4}	40
	c_{vp5}	60
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	10
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	10
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtv2}	20
	c_{vtvn}^*	0
Costo de backlog del producto p	cf_1	10
	cf_2	14
	cf_3	19
Capacidades volumétricas y másicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpp}	10
	Q_{vpm}	10
	Q_{vav}	10
	Q_{vam}	10
	Q_{vtv}	20
	Q_{vtm}	20
Stock de cada envase en cada cliente	s_{31}	50
	s_{42}	40
	s_{**}	0
Porcentaje de envases a recuperar sobre el stock de disponibles en los clientes	a	1

Tabla 108: Distribución de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 5.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	Z_{3tv21}	1
	Z_{3tv32}	1
	Z_{3tv33}	1
	Z_{4tv11}	1
	Z_{4tv23}	1
	Z_{***}	0
	Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{****}
Cantidad de envases e recuperados del cliente n con el camión v en el período t	r_{31tv21}	20
	r_{31tv32}	10
	r_{31tv33}	20
	r_{42tv11}	20
	r_{42tv23}	20
	r_{****}	0

Tabla 109: Distribución de la producción con opciones de retorno - Resultados de las variables - Caso 5.

Caso 6: Utilización de camión propio para ida y vuelta

El último escenario de validación consiste en favorecer a que el camión propio abastezca a determinado cliente con productos en una visita, y que en la misma retorne con envases disponibles para su recuperación. Esto significaría que la variable binaria se activaría una única vez, ya que la visita concentra ambas necesidades (llevar productos y traer envases). Los datos ingresados corresponden a validar ese caso, y la solución arrojada por el modelo cumple con lo esperado.

Demanda	d_{211} d_{***}	50 0
Costo de visitar al cliente n con el camión propio	c_{vpn}^*	10
Costo fijo de usar un camión de agencia	c_{vaf}	50
Costo dependiente de la cantidad de producto de usar un camión de agencia	c_{vav}	50
Costo de visitar al cliente con el camión tercerizado	c_{vtvn}^*	10
Costo de backlog del producto p	cf_p^*	50
Capacidades volumétricas y máxicas de todos los tipos de transporte	Q_{vpv}	50
	Q_{vpm}	50
	Q_{vav}	0
	Q_{vam}	0
	Q_{vtv}	0
	Q_{vtm}	0
Stock de cada envase en cada cliente	s_{21}	50
	s_{**}	0
Porcentaje de envases a recuperar sobre el stock de disponibles en los clientes	a	0.04

Tabla 110: Distribución de la producción con opciones de retorno - Parámetros de entrada - Caso 6.

Variable indicadora de visitar al cliente n con el camión v en el período t	z_{2p1}	1
	z_{***}	0
Cantidad de producto p entregada al cliente n con el camión v en el período t	w_{21p1}	50
	w_{***}	0
Cantidad de envases e recuperados del cliente n con el camión v en el período t	r_{21p1}	2
	r_{***}	0

Tabla 111: Modelo inverso: Distribución de la producción - Resultados de las variables - Caso 6.