

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO



DIRECCIÓN  
DE POSGRADO

## Doctorado en Ingeniería Industrial -Carrera Interinstitucional-

### TESIS

---

MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE  
REQUERIMIENTOS DE MATERIALES EN INDUSTRIAS REGIONALES DE MENDOZA

---

TOBARES, Tania Daiana

15/12/2023



## **Doctorado en Ingeniería Industrial -Carrera Interinstitucional-**

---

MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE  
REQUERIMIENTOS DE MATERIALES EN INDUSTRIAS REGIONALES DE MENDOZA

---

**Autor:**

ING. TOBARES, Tania Daiana

**Director:**

DR. ING. SANCHEZ VARRETTI, Fabricio Orlando

**Co-director:**

DR. ING. PALMA, Ricardo Raúl

15/12/2023



## DOCTORADO EN INGENIERIA INDUSTRIAL

### ACTA DE DEFENSA PÚBLICA DE TESIS

En la Ciudad de Mendoza siendo las 13.00 horas del día 6 de junio de 2024 se reúne en Acto Público el Jurado encargado de evaluar la Defensa del Trabajo de Tesis de la Carrera de Posgrado Doctorado en Ingeniería Industrial titulada "MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICO PARA LA PLANIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE MATERIALES EN INDUSTRIAS REGIONALES DE MENDOZA", desarrollado por la alumna **Ing. Tania Daiana TOBARES** bajo la dirección del Dr. Fabricio Orlando SANCHEZ VARRETTI y co-dirección del Dr. Ricardo Raúl PALMA.

El Jurado fue designado por el Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería según Resolución N° 018/2024 CD, y está integrado por:

Titulares:

- Dr. Daniel Horacio VALDEÓN
- Dra. Marta Silvina MALDONADO
- Dra. Lorena Andrea BEARZOTTI (Externa)

Suplentes:

- Dr. Fernando Manuel BULNES
- Dr. Juan Carlos MICHALUS

La alumna **Ing. Tania Daiana TOBARES** efectúa la defensa de su Tesis.

A continuación, los miembros del Jurado efectúan preguntas, consultas y comentarios que estimaron convenientes para ser contestadas por la alumna **Ing. Tania Daiana TOBARES**.

Seguidamente el Jurado se reúne en Sesión Privada para calificar la Tesis defendida, la que obtiene la calificación de "*Sobresaliente*" por unanimidad.

Se comunica a la alumna **Ing. Tania Daiana TOBARES** la calificación obtenida.

Se cierra este Acto siendo las 14.30 horas del día 6 de junio de 2024.



Dr. Daniel Horacio  
VALDEÓN



Dra. Marta Silvina  
MALDONADO



Dra. Lorena Andrea  
BEARZOTTI

## **DEDICATORIA**

*Dios*

*Dr. Martín Alias*

*Mis Padres Rosa y Omar*

*Mi familia Jonathan y Pedro*

*Mis hermanos Vanesa, Daniel y mis sobrinos*

*Mis amigas, Daniela y Valentina*

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco en primer lugar a Dios y a la Santísima Virgen María por permitirme llegar a esta instancia.*

*Al Doctor Martín Alias, quien se convirtió en el instrumento de Dios y actuó con una profunda vocación en la restauración de mi salud, al comienzo del Doctorado.*

*A mi querida familia, conformada por mis padres, esposo, hijo, hermanos y queridas amigas, quienes siempre me brindaron su apoyo y aliento con su amor y paciencia inquebrantables. Su comprensión y compañía resultaron esenciales para lograr los resultados alcanzados en esta tesis.*

*A mis directores, Fabricio Orlando Sanchez Varretti y Ricardo Raúl Palma, de quienes absorbí la ética laboral incansable y el enfoque científico aplicado en el campo de la ingeniería. Sin embargo, lo que más valoro es su generosidad al compartir su conocimiento y su dedicado deseo de contribuir a la sociedad mediante el saber.*

*A la Universidad Nacional Tecnológica - Facultad Regional de San Rafael por su constante apoyo y confianza en mí desde el inicio de esta etapa. Al Doctorado Interinstitucional en Ingeniería Industrial, por brindarme un sólido estímulo en el transcurso de esta carrera de posgrado. Extiendo mi gratitud a mis colegas del equipo de investigación SiCo, con un agradecimiento especial a Miguelina Mieras, cuyo aporte de sus conocimientos y habilidades llegó en un momento crítico y fue de gran valor.*

*A cada persona que me acompañó en este trayecto, a quienes llevo en lo más profundo de mi corazón como un cariñoso recuerdo.*

# Índice general

RESUMEN . . . . .	9
ABSTRACT . . . . .	10
Estructura de Tesis . . . . .	11
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
1.1. Descripción de la Situación Problemática . . . . .	15
1.2. Problema Científico . . . . .	21
1.3. Hipótesis General de Investigación . . . . .	22
1.4. Objetivos . . . . .	23
1.4.1. General . . . . .	23
1.4.2. Específicos . . . . .	23
1.5. Novedad Científica . . . . .	24
<b>II. MARCO TEÓRICO-REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>27</b>
2.1. Esquema de revisión bibliográfica . . . . .	28
2.2. Estado del Arte . . . . .	30
2.2.1. MRP (Material Requirements Planning) . . . . .	31
2.2.2. Dimensionamiento de Lote . . . . .	35
2.2.3. Crecimiento Económico . . . . .	44
2.2.4. Estado de la Práctica . . . . .	55
2.3. Conclusiones parciales del análisis del Marco Teórico-Referencial . . . . .	62
<b>III. METODOLOGÍA Y RESULTADOS</b>	<b>64</b>
3.1. Modelo propuesto . . . . .	66
3.1.1. Bases y supuestos de partida . . . . .	66
3.1.2. Variables . . . . .	67
3.1.3. Índices . . . . .	67
3.2. Análisis de todas la formas de realizar los pedidos . . . . .	68
3.2.1. Representación de Todas las Combinaciones Posibles . . . . .	72
3.2.2. Algoritmo de Wagner y Whitin vs TCP . . . . .	73
3.2.3. Construcción de matriz para Todas las Combinaciones Posibles . . . . .	76

3.3. Algoritmo propuesto . . . . .	80
3.4. Modelo para un Sistema Homogéneo . . . . .	81
3.4.1. Comportamiento de los tamaños de agrupamientos . . . . .	86
3.5. Análisis estadístico para un Sistema Heterogéneo . . . . .	98
3.5.1. Análisis comparativo de Modelo propuesto vs Metodología de Inteli- gencia Artificial (Clustering – K-Means) . . . . .	116
3.5.2. Conclusiones parciales del análisis de Metodología y Resultados . . . . .	120
<b>IV. Validación del Modelo Propuesto</b>	<b>122</b>
4.1. Sistema Elásticos de Resortes . . . . .	123
4.1.1. Modelo con base en el comportamiento de un Sistema de Resortes . . . . .	123
4.1.2. Validación comparativa entre el modelo propuesto y las distintas técni- cas de dimensionamiento de lote . . . . .	138
<b>V. Aplicaciones del Modelo. Casos de estudio</b>	<b>140</b>
5.1. Industria alimenticia. Producción de frutos secos . . . . .	141
5.2. Industria alimenticia. Producción de pulpa concentrada . . . . .	150
5.2.1. Implementación del modelo . . . . .	151
5.3. Industria Manufacturera. Producción de envases de polietileno de baja densidad	154
5.3.1. Implementación del modelo . . . . .	154
5.4. Plataforma digital - Política de abastecimiento de material . . . . .	160
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>168</b>
6.1. Conclusiones generales . . . . .	169
6.2. Recomendaciones . . . . .	171
6.3. Líneas de Investigación Futuras . . . . .	172
Referencias . . . . .	174
<b>Anexos</b>	<b>187</b>

# Índice de cuadros

2.1.	Características del modelo general del problema de dimensionamiento de lote. Fuente: elaboración propia con base en Karimi (2003). . . . .	34
2.2.	Análisis comparativo de las técnicas para el dimensionamiento del tamaño de lote. Fuente: elaboración propia con base a la página GenLots (Schenker, 2020) .	37
2.3.	Descripción del total de PyMEs por provincias. Sectores y distritos principales. Fuente: elaboración con base en el Ministerio de trabajo, Empleo y Seguridad Social (MTESS) (Ministerio de Economía, 2021). . . . .	48
2.4.	Descripción de tecnologías digitales de frontera. Fuente: CEPAL elaborado en base a Cetic.br (2019) y Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2020). .	53
3.1.	Opciones para satisfacer los requerimientos netos de dos periodos, según todas las combinaciones posibles. . . . .	68
3.2.	Opciones para satisfacer los requerimientos netos de tres periodos, según todas las combinaciones posibles. . . . .	69
3.3.	Opciones para satisfacer los requerimientos netos de cuatro periodos, según todas las combinaciones posibles. . . . .	70
3.4.	Representación de las opciones de pedido $j$ para un sistema de tamaño $N$ . . . .	73
3.5.	Cantidad total de las opciones de pedido para satisfacer diferentes tamaños del sistema ( $N$ ), según $W&W$ y todas las combinaciones posibles (TCP). . . . .	75
3.6.	Patrón de comportamiento de las columnas para el cálculo de todas las opciones de pedir cuando $N = 5$ . . . . .	77
3.7.	Patrón de comportamiento de las columnas para el cálculo de todas las opciones de pedir . . . . .	80
3.8.	Cantidades necesarias de suministros $\alpha_i$ en cada periodo para un sistema de tamaño $N$ . . . . .	82
3.9.	Cantidad de periodos acumulados en cada pedido. Descripción de tres de dieciséis ( $2^{N-1}$ ) posibilidades de realizar los pedidos en un tamaño de horizonte $N = 5$ . . . . .	83
3.10.	Doce posibilidades de las dos mil cuarenta y ocho ( $2^{N-1}$ ) alternativas de pedir material para un sistema de tamaño $N = 12$ . . . . .	98

4.1. Tiempos de cada modelo para resolver el problema del tamaño de lote para un sistema $M = 30$ . . . . .	138
5.1. Resumen del análisis comparativo del costo total entre diferentes técnicas del dimensionamiento de lote y modelo propuesto . . . . .	153
7.1. Clasificación de las PyMEs. Fuente: elaboración propia con datos extraídos de la Secretaría de Emprendedores y PyMEs del Ministerio de Producción (Ministerio de Producción, 2019). . . . .	187

# Índice de figuras

1.1.	Teoría de Anderson aplicada a la popularidad de las variedades del vino. . . . .	16
1.2.	Costos logísticos/GNP vs Relación industrias-países. Fuente: elaborado a partir de Farahani et al., (2009). . . . .	17
1.3.	PyMEs industriales que utilizan software. Área de aplicación. Fuente: Fundación Observatorio PyME. . . . .	19
2.1.	Metodología aplicada para el desarrollo del estado de arte y de la práctica. Fuente: elaboración propia. . . . .	29
2.2.	Hilo conductor del Marco Teórico Referencial de la Investigación. Fuente: elaboración propia. . . . .	31
2.3.	Planificación de la producción. Planificación de requerimientos de material ( <i>MRP</i> ). Fuente: elaboración propia con base a la página Ingenio Empresa. 1231212312	32
2.4.	Esquema de una serie de pedidos ( $N = 5$ ) con dos grupos de tamaños 2 y 3. . .	44
2.5.	Esquema de un sistema unidimensional compuesto por cinco requisitos (círculos) y dos agrupaciones (colores). . . . .	44
3.1.	Comparación entre la cantidad de opciones propuestas por el modelo TCP y las generadas por el algoritmo <i>W&amp;W</i> ; en función del tamaño del sistema ( $N$ ). . .	74
3.2.	Relación entre el costo total reducido y el tamaño de dos agrupamientos ( $a_{jk}$ ) para un tamaño del sistema $N=10$ . La línea continua se comporta sólo como una guía. . . . .	89
3.3.	Relación entre el costo total reducido y el tamaño de dos agrupamientos distintos ( $a_{jk}$ ), en horizontes de planificación $N$ . La línea continua se comporta sólo como una guía. . . . .	91
3.4.	Relación entre el costo total reducido y el tamaño de tres agrupamientos ( $a_{jk}$ ) para un sistema de tamaño $N = 21$ . . . . .	93
3.5.	Vista superior que muestra los costos totales en función de los tamaños de agrupamientos $a_{j1}$ y $a_{j2}$ . . . . .	94
3.6.	Espacio de soluciones factibles para los mismos valores de agrupamientos en el eje de las abscisas, donde el mínimo de la función del costo total está en $a_{jk} = 7$ .	95

3.7. Función de frecuencia relativa de los tamaños de los agrupamientos $a_{jk}$ de las soluciones óptimas para un sistema de tamaño $N = 10$ y $C_p/C_m = 25$ , el valor más probable de $a_{jk}$ es $\sim 2$ . Se observa una curva sobreimpresa, que describe distribución de densidad de probabilidad de esa serie de datos. . . . .	101
3.8. Función densidad de probabilidad para los tamaños de sistemas $2 \leq N \leq 20$ , en función de los tamaños de agrupamientos ( $a_{jk}$ ). Se observa que, independientemente del tamaño del sistema, el valor más probable de $a_{jk}$ es $\sim 2$ cuando la relación de costos es $C_p/C_m = 25$ . . . . .	102
3.9. Distribución de frecuencia de los tamaños de agrupamientos $a_{jk}$ de las soluciones óptimas para un sistema de tamaño $N = 10$ y, $C_p/C_m = 100$ . Se observa una curva sobreimpresa que describe la función de densidad de probabilidad de la serie de datos. . . . .	103
3.10. Funciones de densidad de probabilidad de los tamaños $2 \leq N \leq 20$ y $C_p/C_m = 100$ ; en función de los tamaños de agrupamientos $a_{jk}$ . . . . .	104
3.11. Comparación de la frecuencia relativa para $C_p/C_m = 25$ y $C_p/C_m = 100$ para el mismo tamaño de sistema en función de los tamaños de agrupamientos $a_{jk}$ . Se observa el cambio en el tamaño óptimo del pedido en función de la relación $C_p/C_m$ . . . . .	106
3.12. Frecuencia relativa para los diferentes tamaños de agrupamientos óptimos $a_{jk}$ , para un sistema de tamaño $N = 10$ y $C_p/C_m = 200$ . . . . .	107
3.13. Función de densidad de probabilidad para los tamaños $2 \leq N \leq 20$ y $C_p/C_m = 200$ . . . . .	108
3.14. Comparación de la frecuencia relativa para $C_p/C_m = 25, 100$ y $200$ , para tamaños $1 \leq a_{jk} \leq 7, N = 7$ . Se observa el cambio en el tamaño óptimo del pedido en función de la relación $C_p/C_m$ . . . . .	109
3.15. Distribuciones de la función de densidad de probabilidad para los tamaños $2 \leq N \leq 20$ y $C_p/C_m = 300$ . . . . .	110
3.16. Comparación de la frecuencia relativa para $C_p/C_m = 30, 100, 200$ , y $300$ , para tamaños $1 \leq a_{jk} \leq 6$ . Se observa el cambio en el tamaño óptimo del pedido en función de la relación $C_p/C_m$ . . . . .	112
3.17. Tamaños medios de los agrupamientos $\langle a_{jk} \rangle$ en función de la relación de costos de pedido y almacenar material $C_p/C_m$ . . . . .	114
3.18. Tamaños medios de los agrupamientos $\langle a_{jk} \rangle$ en función del tamaño del sistema $N$ y para diferentes relaciones de costos de pedir y almacenar material $C_p/C_m$ . . . . .	115
3.19. Costo total en función del tamaño promedio de pedido. Dos cluster de los tamaños promedios de pedidos. . . . .	117
3.20. Costo total en función del tamaño promedio de pedido. Tres cluster de los tamaños promedios de pedidos. . . . .	118

3.21. Costo total en función del tamaño promedio de pedido. Cinco cluster de los tamaños promedios de pedidos. . . . .	119
4.1. Representación esquemática de un conjunto de $(N - 1)$ partículas (círculos sólidos) conectadas por $N$ muelles lineales. . . . .	124
4.2. Costo total $(H_0 + V_0)$ vs. a cantidad de pedidos $N$ y para tamaño de sistema $M$ ( $1 \leq M \leq 12$ ) y $\gamma = 1, 0$ . Se observa que cuando la cantidad de pedidos es igual al tamaño del sistema y el costo total es mínimo, $N_{op} = M$ . . . . .	129
4.3. Costo total $(H_0 + V_0)$ en función del número de pedidos $N$ para un sistema de tamaño $M = 12$ , $C_p = 1, 0$ , $\alpha = 1, 0$ y $0, 5 \leq \gamma \leq 11, 0$ . Los distintos valores de $\gamma$ se consiguieron variando $C_m$ : $C_m = 4, 0$ ( $\gamma = 1/2$ ); $C_m = 2, 0$ ( $\gamma = 1, 0$ ); $C_m = 1, 0$ ( $\gamma = 2, 0$ ); $C_m = 2/5$ ( $\gamma = 5, 0$ ); $C_m = 4/15$ ( $\gamma = 7, 5$ ) y $C_m = 2/11$ ( $\gamma = 11, 0$ ). . . . .	131
4.4. Costo total en función del tamaño de los pedidos para $M = 24$ , $C_p = 1, 0$ , $C_m = 1, 0$ y $0, 1 \leq \gamma \leq 8, 0$ . Los distintos valores de $\gamma$ se obtuvieron variando $\alpha$ : $\alpha = 20, 0$ ( $\gamma = 1/10$ ); $\alpha = 4, 0$ ( $\gamma = 1/2$ ); $\alpha = 2, 0$ ( $\gamma = 1, 0$ ) y $\alpha = 0, 25$ ( $\gamma = 8, 0$ ). . . . .	135
4.5. Costo total $(H_0 + V_0)$ en función de la cantidad de pedidos $N$ para un sistema de tamaño $M = 24$ , $C_m = 1, 0$ , $\alpha = 1, 0$ y $2, 0 \leq \gamma \leq 64, 0$ . Los distintos valores de $\gamma$ se obtuvieron variando $C_p$ : $C_p = 1, 0$ ( $\gamma = 2, 0$ ); $C_p = 2, 0$ ( $\gamma = 4, 0$ ); $C_p = 8, 0$ ( $\gamma = 16, 0$ ) y $C_p = 32, 0$ ( $\gamma = 64, 0$ ). . . . .	137
5.1. Comparación entre los costos totales ( $CT$ ) en función de los tamaños de agrupamientos ( $a_{jk}$ ) en un sistema $N = 21$ para dos y tres agrupamientos de pedidos. . . . .	143
5.2. Inventario neto del material almacenado para diferentes políticas de pedidos. . . . .	144
5.3. Costo total acumulado en función del tiempo. . . . .	145
5.4. Costo total acumulado en función del tiempo. . . . .	147
5.5. Proveedores de la zona sur de Mendoza en función de la cantidad en $kg$ de fruta seca. . . . .	148
5.6. Proveedores de la zona este de Mendoza en función de la cantidad en $kg$ de fruta seca. . . . .	149
5.7. Costo total $(H_0 + V_0)$ acumulado en función de los periodos $i$ sobre la política de la empresa y el modelo propuesto. . . . .	152
5.8. Consumo de Masterbatch blanco julio-agosto 2022. . . . .	156
5.9. Estrategias de abastecimiento con menor costo – datos julio 2022. . . . .	157
5.10. Estrategias de abastecimiento con menor costo – datos agosto 2022. . . . .	158
5.11. Comparativa de costos totales ( $CT$ ) en función del horizonte de planificación $M = 30$ ; entre política actual de la empresa y modelo propuesto – Julio 2022. . . . .	159
5.12. Comparativa de costos totales ( $CT$ ) en función del horizonte de planificación $M = 30$ ; entre política actual de la empresa y modelo propuesto – Agosto 2022. . . . .	160
5.13. Pantalla de la plataforma digital. Despliegue de periodos. . . . .	161

5.14. Pantalla de la plataforma digital. Selección de periodos. . . . .	162
5.15. Pantalla de la plataforma digital. Despliegue de los valores de los requerimientos para $N=10$ . . . . .	163
5.16. Pantalla de la plataforma digital. Descripción de los valores de los requerimientos para $N=10$ . . . . .	164
5.17. Pantalla de la plataforma digital. Descripción de los valores del costo de pedir y costos de almacenar. . . . .	165
5.18. Pantalla de la plataforma digital. Descripción de la política óptima de abastecimiento. . . . .	166
5.19. Pantalla de la plataforma digital. Descripción de las políticas de abastecimiento restantes con menores costos. . . . .	167
8.1. Descripción del código del Algoritmo. Fuente: elaboración propia. . . . .	188
10.2. Indicadores de producción en la provincia de Mendoza. Fuente: Subsecretaría de Programación de Microeconomía - Subsecretaría de Política Económica (Subsecretaría, 2020). . . . .	190
11.3. Ubicación geográfica de la producción de ciruela en la provincia de Mendoza. Fuente: Instituto de Desarrollo Rural (IDR)-Mendoza (Subsecretaría, 2020). . .	191

## **RESUMEN EJECUTIVO**

En tiempos de globalización y mercados competitivos, es crucial que las organizaciones enfoquen sus actividades en procesos planificados para promover la eficiencia. La Planificación de Requerimientos de Material responde a la necesidad de considerar diversas técnicas alternativas de organización para adquirir la capacidad de adaptación constante a la demanda. El estudio se centra, analíticamente y gráficamente, en el comportamiento del sistema cuando se realizan agrupamientos en un determinado conjunto de órdenes de pedidos. El objetivo de esta Tesis es desarrollar una nueva metodología que permita determinar el tamaño de lote óptimo con menores costos, aplicable a todas las opciones de requerimientos de materiales cuando son constante y variables en cada periodo. Se pretende que las organizaciones aprovechen la generación, integración y análisis de datos a lo largo del proceso productivo para la toma de decisiones en tiempo real.

**Palabras claves:** tamaño de lote; materiales; agrupamientos; optimización.

## **ABSTRACT**

In times of globalization and competitive markets, it is crucial for organizations to focus their activities on processes planned to promote efficiency. Material Requirements Planning addresses the need to consider various alternative techniques of organization in order to acquire the capacity for constant adaptation to demand. The study focuses, analytically and graphically, on the behavior of the system when clusters are carried out in certain set of orders. The objective of of this Thesis is to develop a model that allows us to determine the optimal lot sizing with lower costs by using a mathematical model applicable to all the options of material requirement to Heterogeneous and homogeneous system. It is intended that organizations take advantage of the generation, integration and analysis of data throughout the production process for real-time decision making.

**Keywords:** lot sizing; materials; clusters; optimization.

## **Estructura de Tesis**

En esta sección, se procede a detallar los próximos capítulos con el propósito de guiar al lector.

En el Capítulo 1, se introduce el tema general y el enfoque específico que se abordará. Se plantea el problema planteando preguntas clave, se formula la hipótesis de la tesis para abordar el problema del dimensionamiento de lote y se establecen el objetivo general y los objetivos específicos de la tesis. Además, se presenta el contexto del estudio, incluyendo fuentes consultadas y las teorías que serán exploradas en esta investigación.

En el Capítulo 2, después de una revisión exhaustiva de teorías relevantes relacionadas con el problema del tamaño de lote, se seleccionan aquellas que abordan específicamente el problema planteado en esta tesis. Estas teorías se detallan minuciosamente en el Estado del Arte, junto con investigaciones científicas publicadas en la última década; además, se presenta un Estudio de la Práctica para exponer conocimientos sobre trabajos e investigaciones que revelan aplicaciones existentes relacionadas con el dimensionamiento de lote. En resumen, se describen que las teorías seleccionadas proporcionan una explicación para la ocurrencia de los fenómenos asociados al problema de investigación.

En el Capítulo 3, se detalla minuciosamente la nueva metodología diseñada para calcular el tamaño de lote óptimo; este estudio se enfoca en el comportamiento de los agrupamientos de pedidos, destacando la escasez de evidencia en investigaciones, que se centran específicamente en un modelo matemático relacionado con el recuento exhaustivo de todas las opciones de

pedido en el problema del tamaño de lote.

En el Capítulo 4 se llevan a cabo dos tipos de mecanismos para determinar si el modelo es válido o no; por un lado, se realiza una validación a partir de fenómenos físicos, lo que implica comparar los resultados del modelo con observaciones experimentales o datos de la naturaleza. Por otro lado, se utilizan técnicas de estudio aceptadas en la literatura para validar el modelo, lo que puede incluir la comparación de los resultados del modelo con otros modelos similares o la evaluación de la consistencia interna del modelo. A partir los resultados obtenidos en esta sección se realizaron presentaciones de trabajos completos en eventos científicos:

- “Análisis del número de agrupamientos en función del tamaño del sistema en la MRP”.

Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. San Rafael Mendoza Argentina. ISBN 978-987-46333-1-6.

- “Relación de tamaños de agrupamientos en la MRP”.

X Congreso Argentino de Ingeniería Industrial - COINI 2017. Ciudad, Autónoma Buenos Aires. Argentina. ISBN: 978-84-17211-91-2.

- “Análisis de agrupamientos de pedidos mediante enumeración exhaustiva en la MRP”.

VI Simposio Argentino de Informática Industrial (SII) - JAIIO 46 Córdoba. Argentina. ISSN: 2451-7542.

En el capítulo 5, se describe los resultados obtenidos de las aplicaciones realizadas en las industrias a partir del modelo propuesto y revisión bibliográfica procedente de la investigación con la práctica del día a día en las industrias regionales.

A partir de los resultados obtenidos con las aplicaciones en las industrias, se logra publicar en revista indexada:

Revista: Int. J. of Logistics Systems and Management. “Theoretical relationship between the cluster size of orders in the materials requirement planning”.

Autores: Tania Daiana Tobares, Fabricio Orlando Sanchez Varretti, Margarita Miguelina Mieras, Ricardo Raúl Palma.

Estado: publicado el 14 de septiembre 2023.

DOI. 10.1504/IJLSM.2023.133520

En el capítulo 6, finalmente se detallan las conclusiones generales que derivan de la investigación realizada en esta Tesis Doctoral. Además, se proponen líneas futuras de investigaciones juntamente con recomendaciones para acciones futuras.

# **Capítulo I**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Descripción de la Situación Problemática

La forma en que se concibe la producción y el desarrollo de un plan estratégico para la cadena de suministro<sup>1</sup> requieren una planeación creativa y una investigación cuidadosa (Heizer y Render, 2004); además, estos conceptos se han impuesto en la gestión empresarial y son temas de continuo interés a nivel científico en las organizaciones industriales (Ballou, 2004). Sin embargo, la forma óptima de organizar la producción aún no está completamente desarrollada y comprendida (Holmström y Romme, 2012). La simulación por computadora es una herramienta de apoyo a la hora de facilitar el arduo trabajo de quienes hacen uso de ella para agilizar los tiempos de preparación de tareas (Galve Francés et al., 1993); por este motivo es necesario hacer el mejor uso de los recursos de producción para cumplir con los objetivos de la empresa logrando una fabricación y logística sostenibles (Hoffa y Pawlewski, 2014; Boiteux et al., 2010). Por otro lado, las decisiones estratégicas que adoptan las industrias multinacionales líderes son de gran amenaza a nuevos entrantes como lo son las pequeñas industrias, ya que utilizan nuevas tecnologías con altos costos de inversión (Porter, 2008). En los sistemas productivos regionales no están completamente desarrolladas y comprendidas las formas óptimas de organizar la producción (Holmström y Romme, 2012); entonces se puede decir que las industrias regionales<sup>2</sup> habitualmente carecen de sistemas computacionales y softwares comerciales de uso habitual en la Planificación de Requerimientos de Materiales (Material Requirements Planning, MRP).

Según Anderson (2014), el futuro del comercio no radica en satisfacer la demanda de productos masivos y de gran volumen, sino en la comercialización de copias del mismo producto. Un ejemplo ilustrativo se encuentra en el comercio del vino. Según la Cámara de Comercio,

---

<sup>1</sup>Cadena de suministro: consta de dos o más organizaciones legalmente separadas que están conectadas por flujos de materiales, de información y financieros.

<sup>2</sup>Industrias regionales: aquellas que desarrollan su actividad principal en varias localidades o provincias de una región. <https://blog.spainbs.com/2021/01/948/clasificacion-de-las-empresas>. En este trabajo se consideran todas las localidades de la provincia de Mendoza.

Industria, Agricultura y Turismo de Tunuyán, Valle de Uco es la segunda área más extensa de Mendoza dedicada al cultivo de vid y es la región con mayor dinamismo en la industria vitivinícola. Los principales varietales de uva para la vinificación incluyen Malbec (55 % de la superficie), Cabernet (10 %), y el Chardonnay (7 %). En consecuencia, como se muestra en la Figura 1.1, se puede notar que las variedades de vino como el Malbec, Cabernet y Chardonnay representan un consumo similar a la suma de todas las demás variedades.

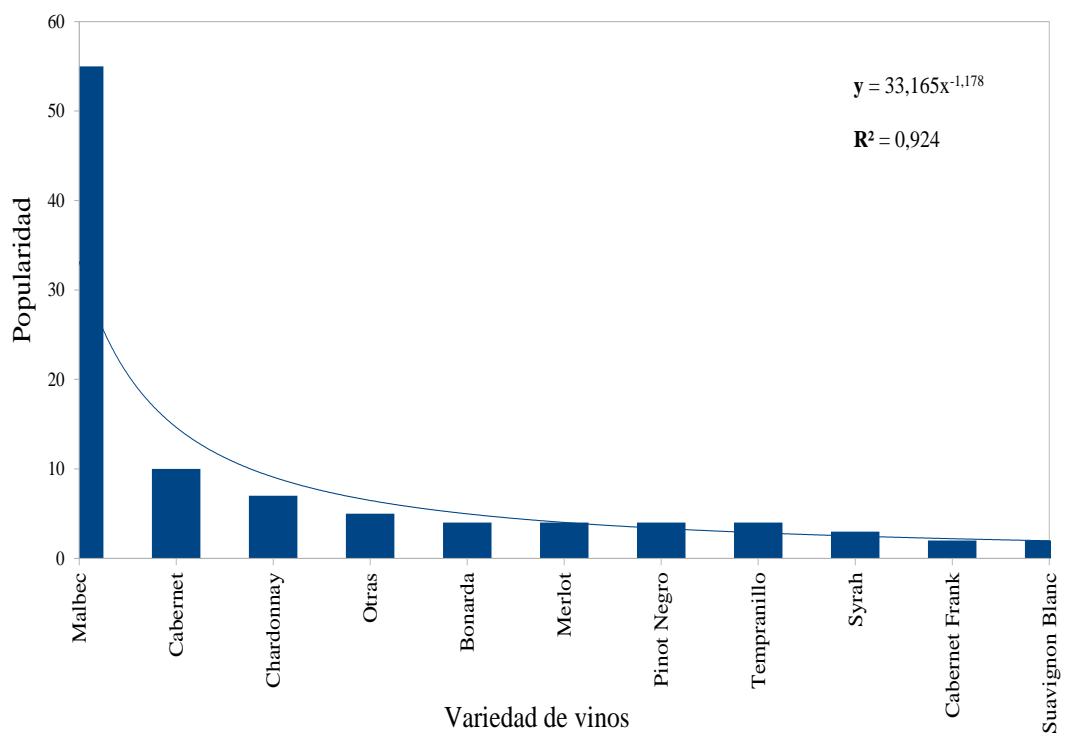


Figura 1.1: Teoría de Anderson aplicada a la popularidad de las variedades del vino.

Por lo tanto, es importante no perder de vista el impacto que podrían tener aquellos produc-

tos que no tienen una demanda masiva; en consecuencia, los productores y empresas regionales podrían aprovechar la comercialización de estos productos mediante el uso de herramientas que proveen tecnología inteligente<sup>3</sup>. Argentina se encuentra dentro de un determinado grupo de países en vías de desarrollo que poseen costos logísticos elevados con respecto a la distribución de materias primas e insumos básicos (Farahani y et al., 2009), como se puede ver en la Figura 1.2. Se observa que los costos logísticos en relación con el Producto Bruto Interno (Gross National Product, GNP), son elevados para países fuertemente relacionados con la agricultura, minería e industria manufacturera.

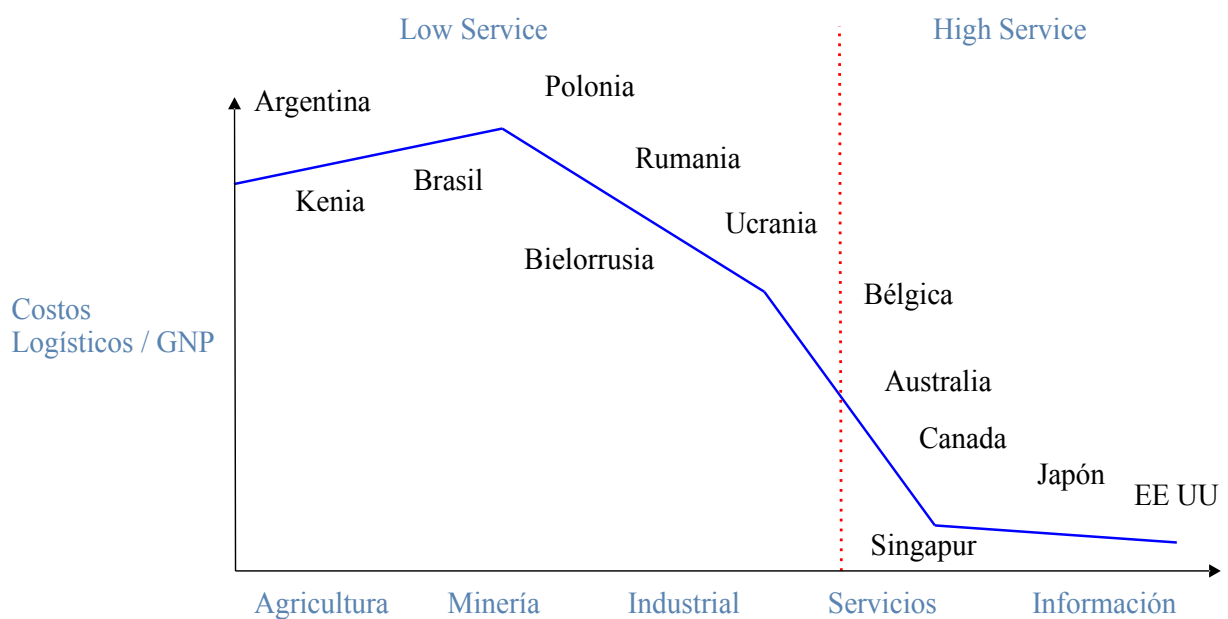


Figura 1.2: Costos logísticos/GNP vs Relación industrias-países. Fuente: elaborado a partir de Farahani et al., (2009).

La demanda creciente de movilidad de productos y de los servicios correspondientes a la logística y al suministro de estos, tiene un costo elevado, especialmente en las economías que están en vías de desarrollo (Wilmsmeier et al., 2014). Este costo obliga a las industrias a desa-

<sup>3</sup>Este concepto se desarrolla en el Capítulo 2.

rollar una MRP rigurosa y eficiente para la producción de bienes y servicios. Por otro lado, se ha propuesto un cambio de paradigma para la formulación de políticas nacionales de logística y movilidad, con pautas comunes para los países de América Latina y el Caribe (Jaimurzina y et al., 2015). Dicho cambio permitió fortalecer el desarrollo y la integración productiva mediante la generación de cadenas de valor <sup>4</sup> que profundizan los mercados nacionales y regionales, y una mejor inserción en la economía global, la generación de una conectividad eficiente entre los eslabones de la cadena, así como también la articulación de proyectos regionales en ciencia, tecnología e innovación para consolidar un cambio estructural con igualdad. En muchos casos, la compra e implementación de insumos implica una inversión alta que requiere de un capital y liquidez que en ocasiones no se tiene; el acceso al financiamiento es otro de los obstáculos mencionados anteriormente. En este contexto, se observa en una encuesta realizada por la Fundación Observatorio PyMEs que el 74 % de PyMEs industriales utilizan software de gestión (PyME, 2016) y sólo la mitad de ese porcentaje lo hace en el área de “Costos y Control” Figura 1.3.

---

<sup>4</sup>Cadena de valor: tipo de metodología que explora todas las actividades involucradas y a su vez interrelacionas en una empresa. Esta herramienta se compone de actividades estratégicas con el fin de analizar cómo se comportan los costos y las fuentes de diferenciación existentes y potenciales (M. Porter, 1985) .

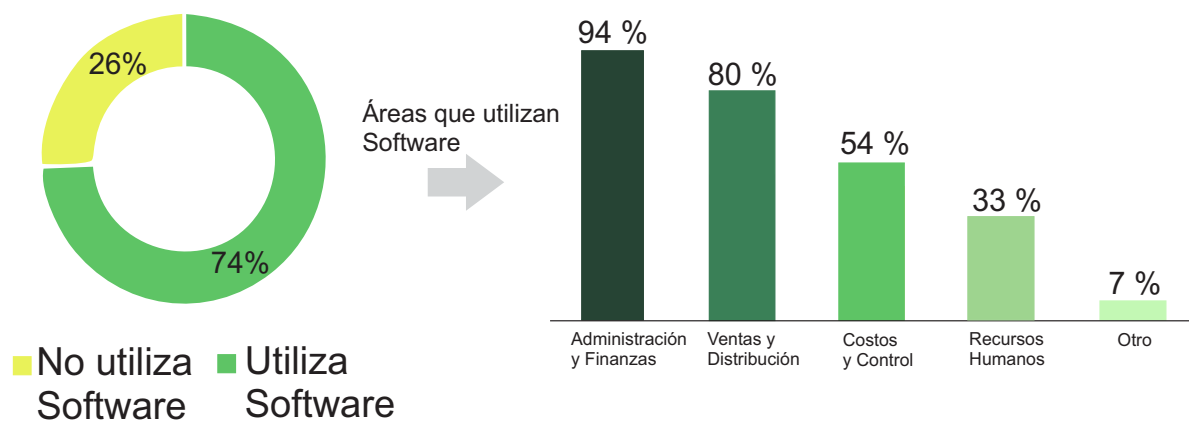


Figura 1.3: PyMEs industriales que utilizan software. Área de aplicación. Fuente: Fundación Observatorio PyME.

La mayor parte del software y servicios informáticos<sup>5</sup> (SSI) de MRP considera programación infinita, es decir carga trabajos en unidades de tiempo sin tener presente la capacidad; esto implica una situación no realista. Entonces se puede decir que en las industrias existe una capacidad determinada para procesar datos, ya sea para un área o departamento y también para maquinarias (Heizer y Render, 2004). Por lo tanto, es necesario la programación finita (“Finite Capacity Scheduling”, FCS). En la actualidad, este tipo de metodología modifica las salidas de los sistemas MRP, de modo que existe una convergencia entre ambos (FCS y Programación infinita).

<sup>5</sup>Según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (1985), el software es la “producción de un conjunto estructurado de instrucciones, procedimientos, programas, reglas y documentación contenida en distintos tipos de soporte físico con el objetivo de hacer posible el uso de equipos de procesamiento electrónico de datos”. Su producción se enmarca en las industrias de las “Tecnologías de la Información” (TI), las que también abarcan al hardware y a los servicios informáticos (tanto los profesionales vinculados a la instalación, mantenimiento, desarrollo, integración de software, como los de soporte técnico de hardware). Su presencia es invisible e intangible; el software está en todas partes. Como señala Torrisi (1998), es una actividad basada en la codificación del conocimiento y la información, con productos y servicios virtualmente inmateriales.

En trabajos recientes se ha analizado el diseño de una cadena de suministro sostenible para proponer un modelo matemático lineal entero mixto para el diseño óptimo de una cadena de suministro. Las herramientas de optimización para diferentes modelos de simulación dan cuenta de la complejidad del sistema en el que estos problemas son abordados por software comercial y desarrollos propios (Guimarães et al., 2015). La gran cantidad de información y datos sin poder procesar dificulta a las organizaciones la gestión de sus actividades y es necesario parametrizarlas. Una investigación reciente presenta un flujo de información consolidado entre la gestión del conocimiento y la gestión de la cadena de suministro (Pinto et al., 2020); entonces es necesario desarrollar sistemas y enfoques alternativos que puedan ayudar a las empresas y la gestión a satisfacer las demandas futuras (Miclo et al., 2019). En este marco, el uso inteligente y eficiente de recursos tecnológicos (internet, telefonía móvil, y redes sociales) junto con la creciente difusión de numerosas actividades en línea (on line), como la banca electrónica y la gestión de la información, se han convertido en una gran atracción de dinámicas productivas y formas de consumo inéditas que caracterizan a la “economía digital” (CEPAL, 2013). En este contexto, se deduce que la industria del software y servicios informáticos podría brindar oportunidades a pequeñas industrias y ocupar un papel fundamental en el crecimiento económico de América Latina y el Caribe.

El enfoque Industria 4.0 brinda nuevas oportunidades a los sistemas de fabricación, especialmente en la gestión de la planificación y el control, abarca desde la adquisición de recursos hasta la cadena de suministro. Existen limitaciones en el desarrollo e implementación de este enfoque en las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs) basadas en la falta de recursos (Majstorovic et al., 2020); además, la mayoría de los estudios académicos disponibles se centran en las empresas multinacionales y tratan de manera similar a las PyMEs en su camino evolutivo hacia la Industria 4.0. Por lo tanto, los requisitos para las pequeñas y medianas empresas a fin de

que se incorporen a la Industria 4.0 pueden considerarse un nuevo objetivo (Mittal et al., 2018). Como se señaló anteriormente, hay muchas herramientas y aplicaciones disponibles que se utilizan para resolver los diferentes esquemas encargados de solucionar problemas en la gestión de la producción; sin embargo, las diferentes escalas productivas entre las industrias regionales y multinacionales hacen que los métodos habituales no produzcan los resultados esperados. En la actualidad existen grandes aportes de métodos y modelación a nivel multinacional, sin embargo, en el ámbito regional o local este aporte puede no satisfacer completamente las necesidades de las empresas locales. En la provincia de Mendoza existen situaciones relacionadas con el tamaño de lote en las industrias que afectan a la producción (Tobares et al., 2021); se puede concluir, que este es uno de los problemas más frecuentes y también uno de los más complejos en lo que respecta a la planificación de la producción. Por otro lado, se observa una diferencia entre la implementación del software en las multinacionales y la aplicación en las pequeñas y medianas empresas. En base a lo explicado hasta aquí, se detalla en la siguiente sección el problema científico que motivó el tema de esta Tesis.

## **1.2. Problema Científico**

Lo expuesto anteriormente conduce a un problema científico a resolver que se manifiesta en la carencia de desarrollo de modelos o métodos que exploren todas las combinaciones posibles de pedidos mediante cálculos computacionales y que sistematice la incorporación de tecnología digitales fomentando el crecimiento económico en PyMEs. De esta manera esto permitirá identificar cuándo, cómo y cuánto de materia prima o insumos debemos adquirir minimizando los costos, reduciendo los desperdicios y tiempos ociosos en industrias regionales de Mendoza, mediante la exploración de todas las combinaciones posibles de las distintas formas de agrupar los pedidos de materiales permitiendo nuevas estrategias de organización industrial.

### **1.3. Hipótesis General de Investigación**

Un modelo dinámico que explore todas las combinaciones posibles para la adquisición de materiales, facilitará el análisis y la comprensión de los costos asociados a los pedidos en las PyMEs, posibilitando la toma de decisiones ágiles y estratégicas.

Al mismo tiempo, este modelo posibilitaría la consideración exhaustiva de una amplia gama de opciones que se examinarían a través de esta metodología.

Se observa que un modelo sencillo tiene la capacidad de resolver situaciones complejas en poco tiempo y contribuye a la mejora económica de quien lo pone en práctica. Su implementación contribuirá tanto a la obtención de mejoras en el sistema productivo, en PyMEs de Mendoza, como a su interacción con el tejido socio económico. A pesar de que el problema de la adquisición de insumos y el abastecimiento de estaciones de trabajo está muy lejos de ser resuelto, una cantidad importante de modelos y aproximaciones han sido desarrolladas en el marco de modelos simplificados de Programación Lineal (ELSP, Economic Lot Scheduling Problem). Esto se ha convertido en un desafío en la gestión de operaciones y la teoría de inventario que ha sido estudiada por gran cantidad de investigadores por más de 50 años y sigue vigente en la actualidad; el principal objetivo de la planeación llevada a cabo por este prototipo es equilibrar los requerimientos y los recursos de producción. Debido al escaso análisis de todas las combinaciones posibles de pedidos, es que se plantea esta nueva metodología. Un tipo de solución habitual a esta clase de problema es la utilización de métodos heurísticos (Nascimento et al., 2010). La dificultad que se pretende investigar en este trabajo es identificar los tamaños de agrupamientos (clusters) más frecuentes dada una relación de costos para posteriormente transferir estas técnicas a sistemas informáticos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Crear y poner a disposición un sistema de referencia en la Planificación de Requerimientos de Materiales (MRP, por sus siglas en inglés) fundamentado en el tamaño promedio de los grupos generados a partir del análisis exhaustivo de las diversas combinaciones de pedidos posibles. Este sistema sería especialmente aplicable a organizaciones emergentes y de alcance regional que aún no han alcanzado una masificación significativa.

### **1.4.2. Específicos**

Para alcanzar el objetivo general planteado en el punto anterior se formularon los siguientes objetivos específicos:

1. Utilizar técnicas de simulación computacional para estudiar el tamaño medio de los agrupamientos formados a la hora de realizar un aprovisionamiento de materiales mediante el análisis de todas las combinaciones posibles de pedidos.
2. Analizar el efecto de distribución de las cantidades pedidas en los agrupamientos formados.
3. Implementar y desarrollar los algoritmos computacionales que permitan realizar simulaciones tendientes a aplicar estos modelos en situaciones reales de la industria y comparar con los métodos estándares.
4. Validar y poner a disposición este modelo en empresas locales de la región, realizando una comparación entre las políticas actuales de estas empresas y los resultados obtenidos mediante la investigación.
5. Desarrollar, diseñar y adaptar plataformas informáticas preexistentes disponibles en la “nube”, con el propósito de simplificar su implementación práctica y estructurada, Focalizar en

impulsar la toma de decisiones y el fortalecimiento de las pequeñas y medianas empresas (Py-MEs) dentro de los ámbitos industriales regionales.

## **1.5. Novedad Científica**

La novedad científica principal que aporta esta Tesis Doctoral radica en la posibilidad de obtener una nueva metodología adaptada a cualquier sistema productivo, que determine el tamaño de grupos de pedidos con relación a los costos involucrados de modo tal de reducir un problema combinatorio complejo en uno más sencillo y controlable. A partir de este marco de referencia en general surgen otros aspectos que constituyen también novedades de esta investigación y que representan aportes:

- 1- La aplicación de este sistema de referencia simplificador a modelos ya existentes muy demandantes en tiempos de cómputo.
- 2- La inclusión de estos criterios en la MRP de industrias regionales para facilitar la toma de decisiones.
- 3- Las herramientas de programación, modelos y gráficos asociados que facilitan el análisis cualitativo y cuantitativo de cada uno de los escenarios posibles.
- 4- La creación, diseño y adaptación de plataformas informáticas preexistentes con el objetivo de agilizar la toma de decisiones en la adquisición de materiales, así como el desarrollo de nuevas plataformas disponibles en la “nube”.

Este marco de programación dinámica general aporta herramientas de apoyo a la comunidad empresarial regional en la toma de decisiones de la MRP de manera que las mismas puedan determinar medidas a corto plazo proporcionando beneficios económicos y sociales a largo plazo alcanzando competitividad y excelencia, disminuyendo costos, reduciendo desperdicios y tiempos ociosos. Dado que existen actualmente nichos en este tipo de industrias, donde los

modelos y herramientas estándar no satisfacen las expectativas esperadas, se puede decir que es una oportunidad de trabajo de investigación que aporta al desarrollo industrial y económico de Mendoza.

El valor teórico consiste en el análisis, conceptualización y desarrollo de un marco de referencia basado en el efecto del agrupamiento tanto de las tareas como los tamaños de pedido sobre las políticas de adquisición de materiales. Es bien conocido el efecto del agrupamiento tanto de las tareas como de los procesos, así como de los sistemas físicos y naturales; donde las combinaciones posibles de ordenamientos de los elementos que los componen son de crucial importancia.

El valor metodológico radica en el empleo del método científico y el análisis de bibliografía exhaustiva; es decir, se ha realizado una recolección y búsqueda de la información, comprobación de la hipótesis planteada y comprobación de dicha hipótesis a la luz de los resultados obtenidos. Las conclusiones obtenidas pueden aplicarse en el campo de las industrias multinacionales o de las PyMEs. Sin embargo, en esta investigación, se aplicarán a las PyMEs debido a que existe un nicho rico para la investigación de este tema; a su vez, se ha elaborado un modelo dinámico con bibliografía teórica y se ha validado en industrias del medio. Por eso dentro de esta metodología, se pueden llevar a cabo casos de estudio, y a su vez, se cuenta con el modelo teórico aplicable a diferentes casos.

El valor práctico de esta metodología se basa en la construcción de un sistema práctico y operatorio, general y simplificador, que pretende encontrar soluciones óptimas para el tamaño de lote, teniendo en cuenta el análisis completo de todas las combinaciones posibles a la hora de realizar un pedido. Esta operación se da en el marco de la Planificación de Requerimientos de Materiales, fundamentalmente en la generación de nuevos conocimientos para este problema y puede ser aplicada a las empresas regionales de Mendoza; de esta manera, la hipótesis planteada

aporta nuevos conceptos que desembocarían en innovaciones, como la disponibilidad informática aplicable al sector productivo. Esto último es relevante para el crecimiento económico, el fortalecimiento de PyMEs y el afianzamiento en las tecnologías digitales.

## **Capítulo II**

# **MARCO TEÓRICO-REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN**

## 2.1. Esquema de revisión bibliográfica

Para la elaboración del estado del arte y de la práctica se empleó un método que explora la recolección, estudio y vinculación de datos cuantitativos (Hernández Sampieri y Mendoza, 2018). La recolección de la información se llevó a cabo integrando tres etapas generales: Búsqueda, Selección Analítica y Obtención de la información para el desarrollo de la bibliografía de revisión (véase Figura 4). En la etapa de “Búsqueda”, se definieron y localizaron palabras clave para la delimitación del tema: “Dimensionamiento de lote”, “Optimización”, “Problemas del tamaño de lote”, “Crecimiento económico en PyMEs”, “Digitalización de tecnología avanzada”. Los resultados del estudio se identificaron a través de referencias bibliográficas. El porcentaje de consulta de fuentes de información fue de un 40 % con base en datos de Science Direct, un 30 % con otras bases de datos bibliográficas, entre ellas Google Scholar, Redalyc y Proquest y, por último, el porcentaje restante con 30 % en libros y sitios de páginas oficiales. A modo de resumen, cabe destacar que se consultaron la gran mayoría de artículos en la sección de Ciencias Físicas e Ingeniería y los resultados obtenidos generaron un total de 274 artículos.

En la etapa de “Selección Analítica”, los artículos seleccionados fueron clasificados bajo el criterio de consistencia, es decir, que tuvieran las palabras claves nombradas anteriormente, en particular “tamaño de lote”. A raíz de esto, fue necesaria una exclusión del 54 % del total obtenido inicialmente.

Por último en la etapa final de “Obtención de la información”, los artículos y documentos finales fueron interpretados y organizados según los siguientes parámetros:

- Contraste de información de un mismo tema en diferentes fuentes.
- Diversos puntos de vista de las fuentes aun cuando no se estaba de acuerdo con ellos.
- Identificación de los argumentos más importantes tendientes a reforzar o sostener la hi-

pótesis.

- Relevancia de la información seleccionada para la construcción de focos temáticos.

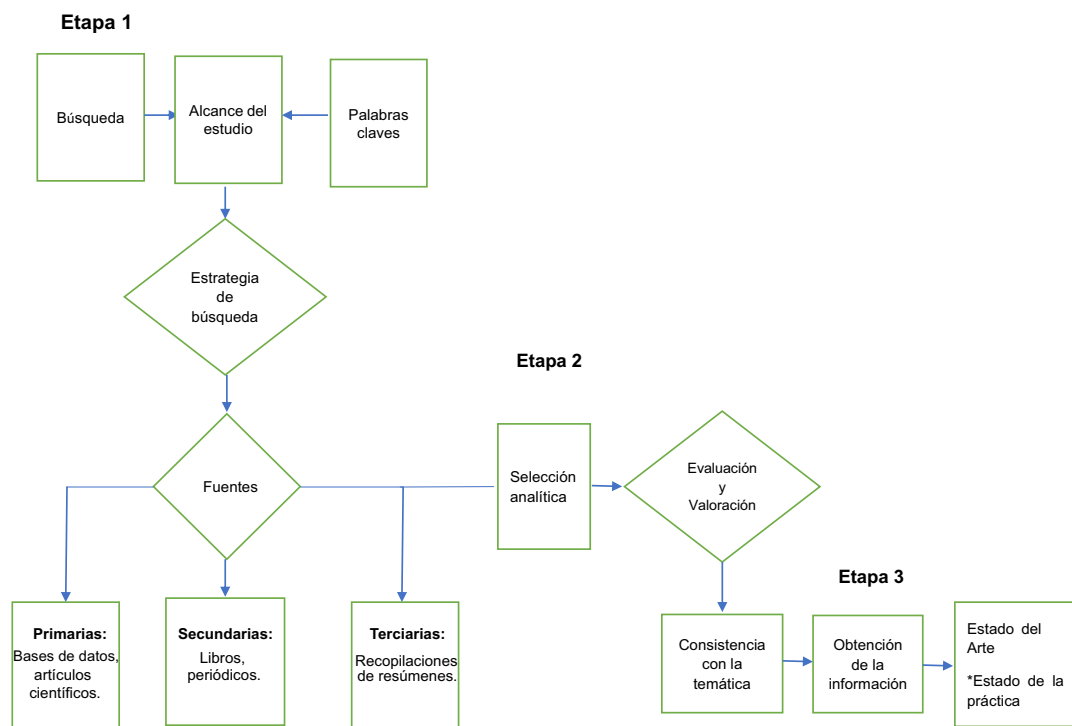


Figura 2.1: Metodología aplicada para el desarrollo del estado de arte y de la práctica. Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenida la información y siguiendo los estudio cuantitativos, el objetivo radica en extender los hallazgos y resultados a una población más amplia. Asimismo, se busca identificar, explicar y anticipar los fenómenos observados al explorar patrones y conexiones causales entre diversas variables. El enfoque central se centra en la formulación, demostración e investigación

de teorías, siendo la hipótesis una meta primordial en este proceso (Hernández Sampieri y Mendoza, 2018).

## **2.2. Estado del Arte**

Una vez descrito el método de exploración de la información en la sección anterior, a continuación, se describen de manera específica las definiciones y conceptos relacionados con el tema de la investigación (véase Figura 2.2 ). La siguiente estructura permitirá el análisis del estado del arte y de la práctica con el fin de sentar las bases teórico-prácticas del proceso de investigación.

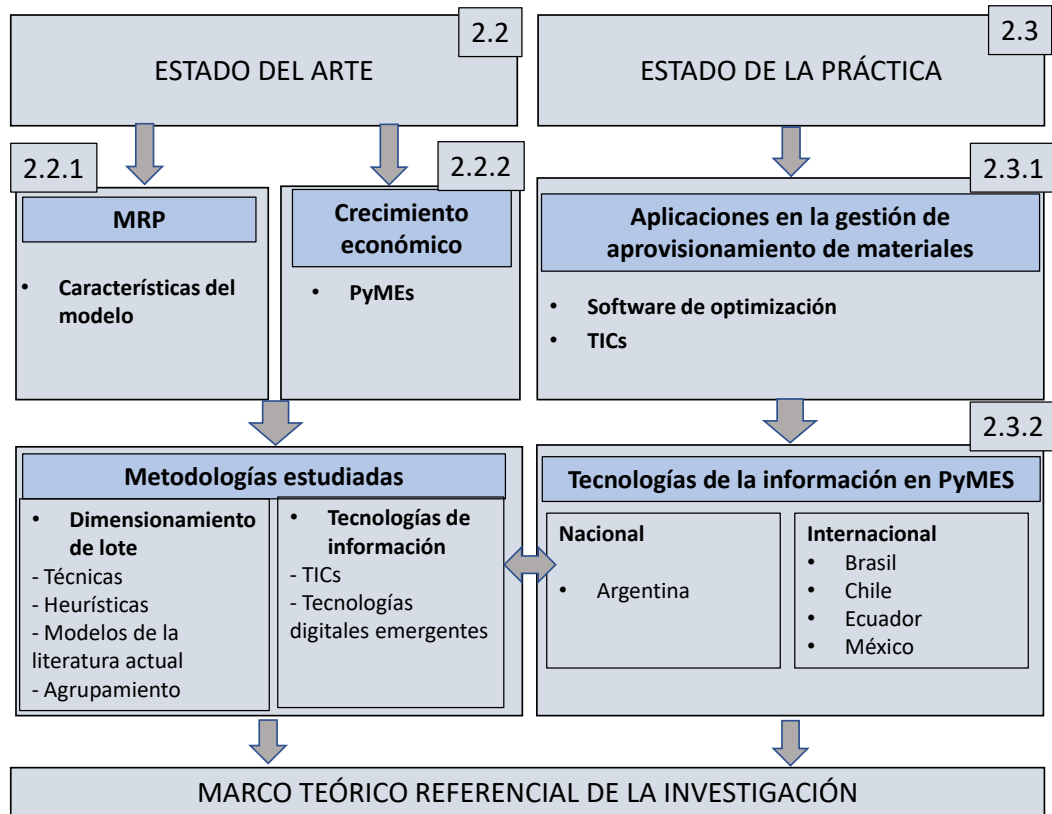


Figura 2.2: Hilo conductor del Marco Teórico Referencial de la Investigación. Fuente: elaboración propia.

### 2.2.1. MRP (Material Requirements Planning)

La planificación de la producción es una actividad que proporciona información a los sistemas de planeación sobre los requerimientos de materiales (se refiere a la compra o producción de las partes o los componentes necesarios para fabricar los productos finales) durante un periodo determinado denominado horizonte de planificación (Heizer y Render, 2004). ¿Qué necesitamos para llevar a cabo un sistema MRP? En la Figura 2.3 se puede apreciar los inputs o

entradas principales de un sistema MRP (F. Betancourt D, 2016).

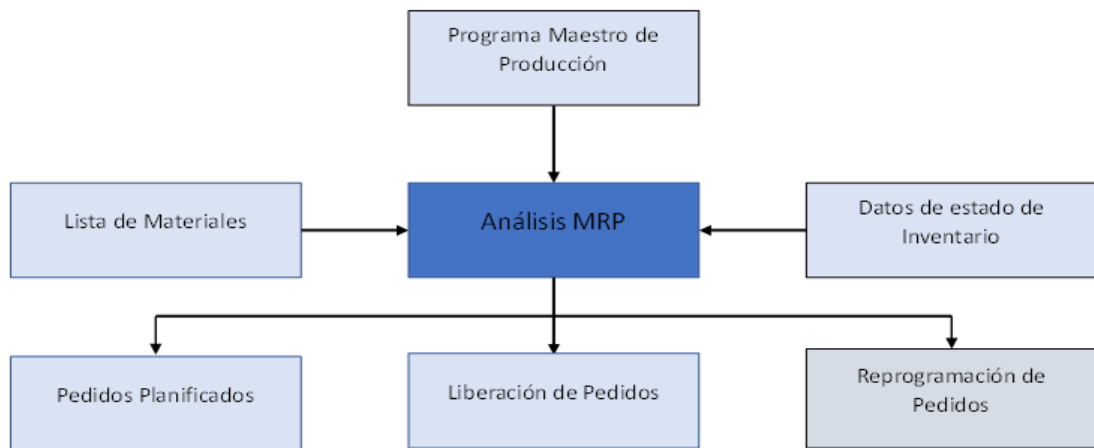


Figura 2.3: Planificación de la producción. Planificación de requerimientos de material (*MRP*). Fuente: elaboración propia con base a la página Ingenio Empresa. (D. Betancourt, 2021)

A continuación, se describe brevemente los elementos de entrada en un sistema MRP:

- 1- El programa maestro de producción (MPS, por sus siglas en inglés) indica la cantidad y el momento en que se necesita cada material. El MPS se basa en dos fuentes de demanda: la demanda pronosticada y los pedidos específicos de los clientes para fechas determinadas.
- 2- Los registros de la estructura del producto, también conocidos como listas de materiales (BOM, por su siglas en inglés), contienen información sobre cada artículo o ensamblaje necesario para fabricar los productos finales.
- 3- Los registros de estado del inventario muestran la situación de todos los materiales en el inventario, incluyendo su disponibilidad, pérdidas y el tiempo estimado de llegada.

Para abordar esta situación, se plantean dos decisiones claves:

- 1- Elegir el momento adecuado para realizar el pedido.

2- Determinar la cantidad óptima del material deseado con el objetivo de minimizar los costos. En relación a la primera situación, el momento del pedido debe establecerse cuando se define la cantidad que llega a la fábrica, que no necesariamente es igual a la cantidad requerida en la línea de producción. Por otro lado, la segunda situación depende del tamaño del pedido. El tamaño del lote se lo define como la cantidad de materia prima e insumo que se compra al proveedor o se producirá internamente para satisfacer la demanda (Viale, 1996). El problema del tamaño de lote surge como parte de la lógica de la Planificación de Requerimientos de Materiales (Baker, 1993; Shapiro, 1993; Thomas y McClain, 1993). También otros autores, como Sollish y Semanik lo denominan estrategia de pedidos de inventario y lo definen como "método para determinar la cantidad de materiales que se van a pedir y el plazo de entrega de ese pedido".

**Características del modelo:** la complejidad de los problemas de dimensionamiento de lotes depende de las características que se tengan en cuenta en el modelo. Las siguientes características, mostradas, en el Cuadro 2.2.1 afectan la clasificación, el modelado y la complejidad de decisiones de tamaño de lote.

	<b>Concepto</b>	<b>Características</b>
Horizonte de planificación	Es el intervalo de tiempo en el que el plan maestro de producción se extiende hacia el futuro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Finito, demanda dinámica.</li> <li>- Infinito, demanda estacionaria.</li> <li>- Sistema continuo o discreto.</li> <li>- Largo plazo: producción de varios artículos.</li> </ul>
Número de niveles	Los sistemas de producción pueden ser de un solo nivel o de varios niveles.	<p>Un solo nivel:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El producto final se produce a partir de materia prima.</li> <li>- Demanda a partir de pedidos de clientes: independiente.</li> </ul> <p>Multiniveles:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La materia prima es procesada por varias operaciones.</li> <li>- Demanda dependiente.</li> <li>- Compleja resolución.</li> </ul>
Cantidad de productos	La cantidad de artículos o productos finales de un sistema de producción es otra característica importante que afecta a la modelización y complejidad de los problemas de planificación de la producción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planificación de la producción de un solo producto.</li> <li>- Planificación de la producción de varios productos.</li> </ul>
Limitaciones de capacidad o recursos	Los recursos o capacidades de un sistema de producción incluyen mano de obra, equipos, máquinas, presupuesto, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay restricciones sobre los recursos: Problema no capacitado.</li> <li>- Existen restricciones de capacidad: Problema capacitado</li> </ul>
Deterioro de los artículos	Cuando se presenta el deterioro de los artículos, se encuentra con restricciones en el tiempo de mantenimiento del inventario.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afecciones en la complejidad del problema</li> </ul>
Demanda	El tipo de demanda se considera una entrada del modelo del problema. En los casos de demanda independiente, las necesidades de un artículo no dependen de las decisiones sobre el tamaño del lote de otro artículo. En los sistemas lote multinivel, donde existe una relación padre-componente entre los artículos, dado que la demanda de un nivel depende de la demanda de sus padres (nivel anterior), se denomina dependiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Demanda estática: constante.</li> <li>- Demanda dinámica: su valor varía en el tiempo.</li> <li>- Si la demanda se conoce: determinística.</li> <li>- Si la demanda es desconocida: probabilística.</li> <li>- Complejidad en demandas dinámicas y dependientes.</li> </ul>
Estructura	Existen dos tipos de estructura de preparación: estructura de preparación simple y estructura de preparación compleja. El cambio de producción entre diferentes productos puede incurrir en tiempo de preparación y costo de preparación. Si el tiempo y el costo de preparación en un periodo son independientes de la secuencia y de las decisiones tomadas en periodos anteriores, se habla de estructura de preparación simple, pero si dependen de la secuencia o de periodos anteriores, se habla de preparación compleja.	<p>Tipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Traspaso de preparación: continuidad en la producción sin modificaciones adicionales.</li> <li>- Preparación mayor: similitudes en el proceso de fabricación y el diseño de un grupo de artículos.</li> <li>- Preparación menor: al cambiar la producción entre artículos de la misma familia.</li> </ul>
Escasez de existencia	Si se permite la escasez, significa que es posible satisfacer la demanda del periodo actual en periodos futuros (caso de acumulación de existencias), o puede permitirse que la demanda no se satisfaga en absoluto (caso de pérdida de ventas).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introduce un coste de escasez en la función objetivo.</li> </ul>

Cuadro 2.1: Características del modelo general del problema de dimensionamiento de lote. Fuente: elaboración propia con base en Karimi (2003).

A partir de la lectura y el estudio de los rasgos de los modelos presentados por Karimi, se puede entender la importancia de las variables que el autor estudia, y solo entonces comenzar con el desarrollo de un modelo nuevo. En otras palabras, las variables imprescindibles para la elaboración del modelo se desprendieron de alguna manera de este resumen presentado en el Cuadro 2.2.1.

### **2.2.2. Dimensionamiento de Lote**

El dimensionamiento estático del lote consiste, según Sipper et al., (1998), en determinar una cantidad de pedido fija o pedir exactamente la cantidad que se necesita para cubrir la demanda prevista.

#### **Técnicas para el dimensionamiento de lote**

Las diferentes técnicas de dimensionamiento de lote implementadas en empresas industriales se pueden clasificar en estáticas, periódicas o dinámicas. También se encuentra la metodología Algoritmo Silver-Meal (SM) que fue desarrollado en 1973 por Meal y Silver (1969) que resuelve el problema de cantidad de pedido de múltiples proveedores no capacitados con descuentos de todas las unidades variables en el tiempo (UMSOQP VAD, por su siglas en inglés). El dimensionamiento periódico de lotes agrupa los requerimientos que se encuentran en un periodo determinado. Para el dimensionamiento dinámico de lotes, se tiene en cuenta la demanda acumulada pronosticada a lo largo de todo el horizonte de tiempo para determinar las cantidades de pedido óptimas. Esto se realiza a medida que avanza el tiempo y se ajustan los requerimientos de producción para el nuevo horizonte de planificación.

**Técnicas de dimensionamiento de lote estáticos:** consisten en pedir una cantidad fija o la cantidad exacta de requerimientos para la fecha necesaria. Estos métodos son: Cantidad Fija

de Pedido, Cantidad Económica de Pedido (EOQ, por sus siglas en inglés) (Erlenkotter, 1990), Lote por Lote y Lote Único. Wilson contribuyó con un enfoque estadístico para encontrar puntos de pedido, popularizando así, la fórmula EOQ en la práctica. Este método determina un solo punto o cantidad y asume una demanda constante; pero, cuando la tasa de demanda varía de un periodo a otro, los resultados de la fórmula EOQ pueden ser engañosos. La técnica que funciona de manera óptima en una situación con demanda variable fue sugerida por primera vez por Wagner & Whitin (Wagner y Whitin, 1958) en su conocido artículo. Usaron programación dinámica para resolver el problema.

**Técnicas de dimensionamiento de lote periódicos:** El dimensionamiento de lotes periódico agrupa varios requerimientos dentro de un intervalo de tiempo para formar un lote. Los procedimientos periódicos de dimensionamiento de lotes son efectivos cuando el costo del inventario<sup>6</sup> es bajo. Se describen como: periodo de suministro (POS, por sus siglas en inglés) y Cantidad Periódica de Pedido (POQ, por sus siglas en inglés).

**Técnicas de dimensionamiento de lotes dinámicos:** en esta técnica el tamaño de lote dinámico considera el efecto de las necesidades acumuladas a lo largo del tiempo para determinar las mejores cantidades de pedido. A medida que avanza el tiempo y se conocen nuevos requerimientos de producción para los materiales entrantes, los pedidos planificados desarrollados anteriormente pueden acabar cambiando. Se denominan: Costo Unitario Mínimo (LUC, por sus siglas en inglés), Costo Total Mínimo (LTC, por sus siglas en inglés) y Equilibrio Parcial del periodo (PPB, por sus siglas en inglés) (Sipper et al., 1998). También, se encuentra la metodología Algoritmo Silver-Meal (SM) (Thompson et al., 1973), que resuelve el problema de cantidad de pedido de múltiples proveedores no capacitados con descuentos de todas las unidades variables en el tiempo (UMSOQP VAD) (Tempelmeier, 2002). A modo resumen, en el siguiente Cuadro

---

<sup>6</sup>Los costos relacionados en el inventario son los costos de preparación de pedidos (organización del proceso) y costos de mantenimiento (Noori y Radford, 2000).

2.2.2 se aprecia una comparación de los diferentes procedimientos para determinar el dimensionamiento del tamaño de lote, evaluando sus fortalezas y debilidades, de acuerdo con algunos criterios:

	Cantidad Fijo de pedido	Cantidad de Pedidos economicos	Lote por lote	Lote único	periodo Delaware suministros	Cantidad Periódica del pedido	Costo Unitario Mínimo	Costo Total Mínimo	Balance parcial del periodo	Plata Comida	UMSOPQ VAD
Capacidad de integrar restricciones de proveedores como cantidades mínimas/máximos de pedido a la optimización.	Alto	Mediano	Bajo	Bajo	Mediano	mediano	mediano	mediano	mediano	mediano	Alto
Posibilidad de integrar descuentos por cantidad a la optimización.	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
Capacidad de mostrar el costo total de cada una de las opciones de pedidos para un horizonte de planificación	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Nivel de esfuerzo requerido para implementar.	Bajo	mediano	Bajo	Bajo	Bajo	mediano	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Nivel de flexibilidad de adaptación dinámicamente a diferentes niveles de cantidades de pedido.	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Mediano	Mediano	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Costos de hacer pedidos.	Mediano	Mediano	Muy alto	Muy alto	Mediano	Mediano	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Costos de mantenimiento de inventario.	Alto	Mediano	Muy alto	Muy alto	Mediano	Muy bajo	Mediano	Mediano	Bajo	Alto	Bajo
Nivel de requerimiento de datos necesarios para cada técnica.	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Cuadro 2.2: Análisis comparativo de las técnicas para el dimensionamiento del tamaño de lote. Fuente: elaboración propia con base a la página GenLots (Schenker, 2020) .

Del análisis de estos patrones, se puede concluir que algunos métodos consiguieron sobresalir, pues los estudios académicos han demostrado que Silver-Meal representa la mejor compensación entre costo - efectividad y solidez (Jeunet y Jonard, 2000). Por otro lado, el algoritmo

Wagner y Whitin (W&W) funciona mejor para el problema del lote dinámico y a menudo se utiliza como punto de referencia para técnicas heurísticas más simples (Baciarello et al., 2013).

En resumen, se concluye que muchas técnicas arriban a la solución óptima; sin embargo, en muchas situaciones es difícil adaptar esta solución a la situación real de las empresas. Además, las cantidades mínimas y máximas de pedido en cada periodo a menudo tienen un impacto significativo en la cantidad final de pedido tal cual se expone en el Capítulo 3. Por esta razón, la conveniencia del estudio del comportamiento de los tamaños de los requerimientos, y de los costos involucrados, y el análisis particular de cada una de las combinaciones posibles; llevó a la generación de un nuevo modelo que contempla todos estos aspectos y los unifica en un modelo novedoso.

### **Heurística basada en la programación matemática**

Muchas heurísticas sirven de guía para evaluar la calidad de la solución proporcionando un límite inferior a la solución óptima; por otro lado, estas heurísticas tienen una complejidad computacional mucho mayor para los problemas del mundo real. Los trabajos de otros autores, como Billington et al., (1983), Trigeiro (1989) y Diaby et al., (1992), siguen el mismo enfoque básico que Thizy y Van Wassenhove (1985). Por otra lado, Bitran y Matsuo (1986) llegan a la conclusión de que a medida que aumenta el número de productos, la diferencia relativa entre el problema de capacidad relajada y el problema original se vuelve insignificante. Otros autores como, Chen y Rossi (2019) ofrecieron un análisis exhaustivo de los métodos de relajación para el CLSP (dimensionamiento de lotes determinista, dinámico y de un solo nivel: problema de dimensionamiento de lotes capacitado). De esta metodología, se ha tomado la posibilidad de no contar con restricciones a la capacidad, y esto llevó a decidir explorar todas las formas para realizar el pedido.

### **Modelos de la literatura actual**

En este apartado se describen los modelos encontrados en la literatura del tema de investigación los últimos 10 años. Los resultados de varios estudios relacionados con el problema de dimensionamiento de lotes de inventario han sugerido que este tema ha atraído una considerable atención académica e industrial. Según Hoseini et al., (2019) la política óptima de dimensionamiento de lotes en la cadena de suministro tiene un papel industrial importante. Los tamaños de lote definidos en la cadena de suministro permiten a las empresas reducir costos y ofrecer un valor adicional a los clientes. Woarawichai y Naenna (2018) minimizaron los costos totales por medio de modelos para un problema de dimensionamiento de lotes de inventario multiproducto y multiperiodo; también consideraron los descuentos por cantidad del proveedor y la capacidad del vehículo. Por otra parte, los científicos siguieron investigando sobre las modificaciones de los modelos EOQ. Brodetskiy et al., (2019) propusieron el enfoque de la optimización del inventario, lo que permite a los gerentes encontrar una solución para la necesidad del pago anticipado del pedido (en contraste con el modelo EOQ tradicional). Bahroun et al., (2019) presentaron un trabajo que puede clasificarse como investigación aplicada, ya que busca resolver un problema específico; se centraron en describir el diseño y la implementación de una estrategia de solución para el problema que tiene en cuenta el proceso real. Esta solución tuvo que garantizar que la toma de decisiones explore el compromiso entre el tamaño del pedido, el plazo de entrega y el rendimiento. Teniendo en cuenta que las PyMEs y los fabricantes locales desempeñan un papel fundamental en la economía de un país. Nikolić et al., (2021) llevaron a cabo un modelo híbrido del "Método de Organización de Clasificación de Preferencias del Proceso de Jerarquía Analítica Difusa". Identificaron los factores más problemáticos en las PyMEs, uno de los cuales es el aumento de la capacidad. Los parámetros óptimos de la política requieren una búsqueda exhaustiva, en la que el tiempo computacional crece exponencialmente con número de periodos

del horizonte de planificación. Randa et al., (2019) consideraron un problema de dimensionamiento de lotes en un sistema de producción de un solo artículo y una sola etapa que se enfrenta a una demanda estocástica no estacionaria en un horizonte de planificación finito que explora el comportamiento complementario de dos clases de heurísticas. Estos autores examinaron todas las combinaciones por pares de programación dinámica y heurísticas basadas en la búsqueda con tiempos de cálculo razonables. Desde el punto de vista de los periodos del sistema y de un sistema de inventario entrenado, los autores Tai et al., (2021), propusieron un modelo que determina el rendimiento de la gestión del inventario: stock de inventario y exceso de stock existente. Tuvieron en cuenta el retraso de la demanda y los plazos de entrega; el modelo basado en periodos arroja mejores resultados que los modelos basados en promedios. Las diferentes soluciones de reposición también se pueden caracterizar considerando el modelo óptimo de control de inventario. Chen y Rossi (2019) construyeron un modelo de programación dinámica estocástica para un problema de gestión dinámica de inventarios. En este modelo, un pequeño minorista con restricciones de efectivo compra periódicamente un artículo a un proveedor y lo vende a los clientes con demandas no estacionarias; los autores hallaron algunas características del patrón óptimo de pedidos. En un estudio reciente, Jeenanunta et al., (2021) investigaron la optimización del inventario y muestran una técnica de optimización por simulación para determinar el nivel óptimo de pedido de un único producto en un sistema de inventario. Wiśniewski y Szymański (2021) propusieron una metodología práctica en la toma de decisiones de reposición de inventarios con el objetivo de reducir los costos de mantenimiento; presentaron un estudio de caso en el que los resultados demuestran la validez del método propuesto. La revisión de la literatura presentada mostró que la metodología propuesta en este trabajo no ha sido desarrollada previamente.

Recientemente, algunos investigadores examinaron dos métodos heurísticos para el proble-

ma del tamaño del lote. El primer método se refirió a la modificación de la heurística de tamaño de lote de Silver-Meal para incorporar múltiples artículos, múltiples proveedores, escasez, restricciones de capacidad y descuentos por cantidad. El segundo método es un algoritmo genético que resolvió el problema de tamaño de lote propuesto por Alfares y Turnadi (2018). Bogataj et al., (2019) discutieron posibles direcciones para un mayor progreso hacia la sostenibilidad ambiental, la evaluación de riesgos y la reprogramación ágil en el marco de Industria 4.0; además, aseguraron que los modelos de apoyo a la decisión de MRP serán de gran ayuda para mitigar riesgos en situaciones financieras. Los investigadores afirmaron e identificaron que en las PyMEs existen vacíos de investigación que deben ser abordados para apoyar con éxito a este tipo de empresas manufactureras en su avance hacia la Industria 4.0 y la Fabricación Inteligente (SM, por sus siglas en inglés). Propusieron un modelo de madurez en la cadena de suministro realista para las PyMEs que refleja sus realidades industriales con mayor precisión (Mittal, Khan, Romero, y Wuest, 2019).

En síntesis, se puede decir que escasos estudios consideraron el recuento exhaustivo de todas las opciones de pedido en el problema del tamaño de lote. Adicionalmente, hasta el momento, no se ha encontrado evidencia de alguna investigación empírica o teórica a investigar en detalle las interacciones entre el tamaño de los grupos de pedidos y los costos totales.

### **Agrupamiento**

En este apartado del trabajo, se desarrolla el concepto de *agrupamiento* (cluster, por su uso habitual en el idioma inglés) porque se considera fundamental explicar y aclarar este término de modo que el lector comprenda acabadamente su significado e importancia en esta Tesis. El análisis del agrupamiento está relacionado con la forma en que se asocian un determinado número de elementos en función de una medida característica o distintiva. En una agrupación unidimensional, el problema de cómo se agrupan los elementos puede representarse únicamente

mediante una característica típica del sistema, en ese caso es el tamaño de lote; de este modo, para discutir sus propiedades, se debe estudiar la estadística de las agrupaciones en cuestión (Yin et al., 2013).

Por otro lado, el concepto de agrupamiento (cluster), es muy utilizado en diversas ramas de la ciencia y puede ser aplicable al problema del dimensionamiento de lote. Se puede decir que un cluster se produce cuando se encuentra un recurso importante en una determinada región o ámbito. Este recurso puede ser de diferente naturaleza como: recursos naturales, información, grupos de empresas, etcétera, (Heizer y Render, 2004); además, el análisis de los agrupamiento consiste en estudiar las diferentes formas en que los componentes están agrupados (Yin et al., 2013). Desde el punto de vista de la Física, se debe definir un rasgo o medida distintiva que permita la caracterización a fin de diferenciar un estado de otro (Satuffer y Aharony, 2014). En el caso de un agrupamiento unidimensional, y como se observa en diferentes eventos de la naturaleza, el sistema se define como un conjunto de elementos con características similares (Zhang et al., 2016; Sciortino et al., 2005; Kaeffer et al., 2013; Sanchez-Varretti et al., 2019) . No obstante, el agrupamiento a menudo se define como una aglomeración de elementos iguales con espacios vacíos en ambos extremos; a partir de allí, el concepto de agrupamiento lo consideramos como un conjunto de elementos dentro de un mismo lote de pedidos. Incluso, si tiene elementos donde el pedido es nulo. Con base en estas consideraciones, se analiza el tamaño de los clusters y los costos asociados a los mismos; además, el análisis de las distintas formas en que se agrupan los tamaños de pedidos aporta información muy útil a la hora de planificar la producción.

De acuerdo con lo expresado anteriormente, es necesario hacer un buen uso de los recursos productivos y optimizar los servicios para cumplir con los objetivos de la empresa. De esta forma, la planificación óptima de los procesos productivos para lograr una fabricación y una

logística sostenibles tiene que ser el objetivo de las empresas hoy en día (Pawlewski y Greenwood, 2014). La necesidad de las empresas de reducir costos y aumentar sus ganancias ha llevado a enfatizar las actividades logísticas como un enfoque para lograr estos objetivos; entre estas actividades, la gestión de inventarios es una alternativa para reducir los costos de las organizaciones, a través de una mejor gestión de los materiales almacenados y su transporte. En este contexto, es interesante investigar el comportamiento de los tamaños de los grupos de pedidos formados para satisfacer las necesidades del sistema.

A partir de aquí el estudio de los tamaños de pedidos se centra en el análisis del comportamiento de fenómenos físicos como es el caso de la conglomeración de los cluster. En conclusión, la noción de cluster presenta diversos elementos indispensables para comprender el comportamiento de los tamaños de pedido y por ende, colabora al desarrollo propuesto planteado en nuestra hipótesis. Entonces en el Capítulo 3, se detalla los supuestos y variables necesarios para el modelo. Se define en cada periodo de producción una cantidad de materia prima necesaria para el proceso de fabricación. En la Figura 2.4, se puede observar un ejemplo en el que se plasma el esquema propuesto. Las diferentes formas de ordenar los tamaños de pedido podrían llevar al desarrollo de nuevas metodologías que indicarían el número de periodos a agrupar de manera óptima. Estos pedidos permiten la adquisición de recursos que cubran las necesidades de ese grupo de periodos y en consecuencia, las empresas necesitan satisfacer los periodos (del horizonte de planificación) por una serie de clusters (agrupamientos de pedidos), los cuales están compuestos por una cantidad de suministros acumulados.

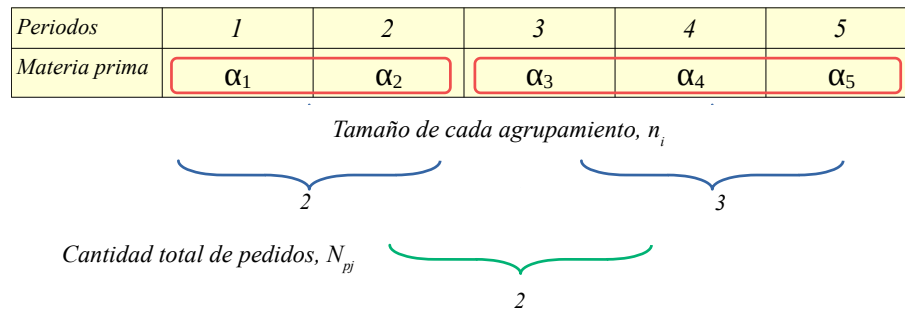


Figura 2.4: Esquema de una serie de pedidos ( $N = 5$ ) con dos grupos de tamaños 2 y 3.

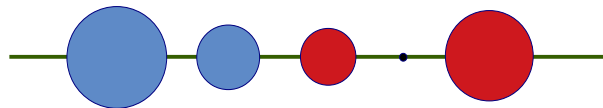


Figura 2.5: Esquema de un sistema unidimensional compuesto por cinco requisitos (círculos) y dos agrupaciones (colores).

En la Figura 2.5, se puede observar un esquema de una red unidimensional donde algunos sitios están ocupados (puntos grandes) y otros no. Los sitios ocupados vecinos forman estructuras denominadas clusters y las cantidades relevantes dependen de la concentración de sitios ocupados y de la geometría de la red; en este caso, cada periodo considerado puede asociarse a una cantidad de orden aunque esté vacío.

De acuerdo con estos supuestos, en el Capítulo 3 se aborda analíticamente el tamaño de este cluster en un sistema donde las cantidades a pedir son constantes y mayores que cero.

### 2.2.3. Crecimiento Económico

La CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), en el área desarrollo económico tiene por objetivo promover el crecimiento económico equitativo de largo plazo, la generación y asignación eficiente de recursos financieros para apoyar el desarrollo y la igualdad

en los países de América Latina y el Caribe. Define que el desarrollo humano es el objetivo central de la actividad humana y el crecimiento económico un medio que podría llegar a ser muy importante para promoverlo. El crecimiento económico proporciona los recursos que permiten mejorar ininterrumpidamente el desarrollo humano y el mejoramiento; algunos autores definen al crecimiento económico como “el Incremento de Productos y Servicios de una Nación, medido y comparado generalmente con el año calendario anterior”. Por otra parte, la Variable que mide el Crecimiento Económico es el PBI (Producto Bruto Interno), se expresa en cifra pecuniaria (dineraria) (Ortiz et al., 2020). Otros autores dicen que “el crecimiento económico es el aumento o expansión cuantitativa de la ganancia y del valor de los bienes y servicios finales producidos en el sistema económico regional, nacional o internacional, en un determinado periodo de tiempo (aproximadamente un año). Este se mide a través de la tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto” (Enríquez Pérez, 2016). Según Naciones Unidas es “el cambio cuantitativo de las variables fundamentales de la economía, siendo el PIB el principal indicador al medir la producción, es decir, se genera crecimiento cuando todos los bienes y servicios producidos por un país en un año son más que los producidos el año anterior” Naciones Unidas. Abarca (2015), expresa que el concepto del crecimiento económico es “el mayor aprovechamiento de los recursos disponibles”. Otra definición al concepto de crecimiento económico es “acumular recursos productivos y desarrollar o asimilar mejores tecnologías productivas” (Samuelson y Solow, 1956).

De acuerdo con la descripción anterior sobre el concepto crecimiento económico expresado por varios autores, se adopta el concepto que propone la CEPAL y el autor Enríquez Perez; se puede decir, que la industria muestra gran capacidad para absorber la investigación tecnológica y conducirla a la producción de nuevos bienes fomentando el crecimiento económico.

## **PyMEs**

El Autor Tambunan señala que las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) desempeñan un papel vital en el desarrollo económico, ya que han sido la principal fuente de generación de empleo y crecimiento de la producción, tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados (Tambunan, 2008). Por otra parte, Beck (2005) afirma que las PyMEs favorecen la movilidad social, promueven la libre competencia, el avance tecnológico y la innovación y contribuyen al crecimiento económico a nivel nacional y mundial. Entonces, la diversificación de las actividades intensivas en tecnología promueve un mayor uso de la ciencia y la tecnología que repercute en el mayor aprendizaje en la práctica; esto resulta en el aumento directo o indirecto de la productividad del tejido empresarial en su conjunto. Por lo tanto, el gran valor estratégico en pequeñas industrias en el desarrollo económico; ya que esta permite tener autonomía tecnológica y mayor crecimiento económico (C. H. Ortiz y Uribe, 2012). Por otro lado, Delfin (2014), considera que las PyMEs son la prioridad para el crecimiento económico de los países. El autor afirma que estas son generadoras de riqueza, ayudan al dinamismo, desarrollan nuevas actividades productivas y se adaptan a las nuevas tecnologías; entonces, es necesario que este tipo de industria, planteen estrategias que permitan alcanzar un desarrollo empresarial. Para esto es preciso que se involucren varios elementos como: crecimiento económico, cultura empresarial, liderazgo, gestión de conocimiento e innovación. Además, comenta que el crecimiento económico en una empresa se establece de acuerdo con la productividad, es decir mayor o menor uso de recursos disponibles que va ligada a la ganancia. Según Ministerio de Economía, Industria y Desarrollo Productivo afirma que las pequeñas empresas argentinas son fundamentales para la recuperación de la economía, en el marco de agenda conjunta de crecimiento y desarrollo en los mercados externos. En el 2021, en Argentina las PyMEs exportaron US 10.800 millones, récord de exportaciones en los últimos seis años. En base a lo expuesto, está claro que las PyMEs son

un importante motor del sistema productivo, producen riqueza y emplean mano de obra a nivel mundial. Dini, Gligo y Patiño (2021), insisten que este tipo de empresas deben alcanzar ciertos niveles de estructura, orden en los procesos, o estadio tecnológico. Por lo tanto, es de suma importancia, la generación de nuevas metodologías que apunten a resolver problemas o mejorar la operación y gestión en las pequeñas industrias. En el Apéndice A se detalla la clasificación de PyMEs.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), las pequeñas y medianas empresas son la forma de organización más difundida a nivel mundial, con una participación de alrededor del 95 % sobre el total del mundo empresarial. Además, son las responsables de la creación del 65 % del empleo en los países que componen dicha organización (CEPAL, 2012); en el caso de América Latina, dichas cifras son aún más elevadas. La proporción de micro, pequeñas y medianas empresas como porcentaje del total asciende al 99 %, en tanto que el cociente de empleo en PyMEs sobre empleo total se ubica en torno al 67 % (Banco de Desarrollo, 2013). Esto quiere decir, que a nivel mundial a mayor sector PyME o mayor número de emprendimientos, mayor su PBI y su empleo. Según el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación, uno de los sectores más importantes la Argentina es el de las PyMEs, ya que generan el 42 % del Producto Bruto Interno (PBI) y es el que más empleo genera, con alrededor del 72 % de los puestos de trabajo de toda la Argentina. El 78,7 % sobre el total de ellas (véase Cuadro 2.2.3), operan en las provincias de Buenos Aires, Capital Federal, Córdoba, Santa Fe y Mendoza.

Se observar, que la provincia de Mendoza se encuentra entre las primeras, ocupando el quinto lugar, de aquellas pequeñas industrias más participativas del sector productivo a nivel país. Por otro lado, a pesar del gran esfuerzo que hacen las pequeñas y medianas empresas y la gran participación en la economía nacional, según el informe de la Bolsa de Comercio de

<b>Provincia</b>	<b>Total de PyMEs</b>
Buenos Aires	168.789
Capital Federal	125.105
Córdoba	48.687
Santa Fe	45.464
<b>Mendoza</b>	18.606
Entre Ríos	13.680
Tucumán	10.443
Resto del País	85.929
<b>TOTAL, PAIS</b>	<b>516.703</b>

Cuadro 2.3: Descripción del total de PyMEs por provincias. Sectores y distritos principales. Fuente: elaboración con base en el Ministerio de trabajo, Empleo y Seguridad Social (MTESS) (Ministerio de Economía, 2021).

Córdoba (2013) “LAS PyMEs EN ARGENTINA“, afirma que estas empresas presentan una importante carencia en el conocimiento de técnicas modernas de gestión. La importancia de planificar en forma estratégica, la orientación hacia los resultados, la medición del desempeño y la búsqueda permanente de la innovación, no han sido aun plenamente incorporadas.

### **Tecnologías de información**

Las tecnologías de la información reducen el costo de la coordinación al interior de las empresas y promueven la asignación flexible de recursos (Kane et al., 2015). Un efecto similar se puede alcanzar en la gestión de las relaciones con proveedores. En este contexto, la reconfiguración de los procesos productivos, los productos y los servicios, reduce en gran medida la dificultad, los costos del cambio de recursos, y variaciones de diseños o modelos o ajustes en el tamaño de los lotes productivos (Warner y Wäger, 2019). A continuación, se describe dos metodologías que incorporan tecnologías necesarias para ayudar a la toma de decisiones en las PyMEs. Por uno lado, tenemos a las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación) y por otro lado se encuentran las herramientas de tecnologías digitales emergente. Tanto las TIC

como las herramientas de tecnologías digitales emergentes son fundamentales para apoyar la toma de decisiones en las PyMEs; estas tecnologías permiten recopilar, analizar y utilizar datos de manera efectiva, mejorando así la capacidad de las PyMEs para tomar decisiones estratégicas y operativas más informadas y acertadas.

### **TICs (Tecnologías de la Información y Comunicación)**

Según la OCDE, las “tecnologías de información y comunicaciones” son aquellos dispositivos que capturan, transmiten y despliegan datos e información electrónica y que apoyan el crecimiento y desarrollo económico de la industria manufacturera y de servicios” (OECD, 2002). Algunos autores afirman que “Las tecnologías de información comprenden todas aquellas herramientas basadas en computadoras que la sociedad emplea para trabajar con información, brindar soporte a la gestión de información y satisfacer las necesidades de información de una organización”. En esta definición ellos incluyen dentro de las TICs a las computadoras personales, Internet, teléfonos móviles, asistentes personas digitales y todo aquel dispositivo similar (Haag et al., 1998). Otros autores definen a las tecnologías de información como “las tecnologías de la información se refieren a todas las herramientas basadas en computadoras y comunicaciones por computadora que se utilizan para adquirir, almacenar, manipular y transmitir información a individuos y unidades de negocio, tanto internas como externas, dentro de una organización. Estas tecnologías abarcan una amplia gama de recursos, incluyendo hardware, software, redes y sistemas de comunicación y su objetivo principal es facilitar el procesamiento y la gestión eficiente de la información, mejorando así la comunicación, la toma de decisiones y las operaciones en una organización” (Benjamin y Blunt, 1992). Porter y Milla: señalan que la revolución de la información está afectando la competencia desde tres aspectos (Porter, Millar et al., 1985) :

- Cambia la estructura de la industria y altera las reglas de la competencia.
- Crea ventajas competitivas, otorgando a las empresas nuevas formas de vencer a sus rivales.

Hoy en día es imposible concebir una empresa exitosa sin el apoyo de tecnologías de información y comunicación (TICs) para administrar sus procesos de negocio. Lo anterior permite visualizar la importancia de las TICs en las organizaciones, dado que tales tecnologías no sólo afectan la forma como se realizan las actividades individuales, sino que también mediante nuevos flujos de información han mejorado de modo significativo la habilidad de explotación de los enlaces entre las actividades dentro y fuera de la organización (Porter, Millar, y et al., 1985). Por otra parte, la discusión ya no se centra en si las TIC proporcionan ventajas competitivas sostenibles, sino en cómo la PyME puede incorporarlas para competir (Manríquez et al., 2009)

. Sin embargo, existen barreras para la adopción de TICs:

- Costos de las TICs y tiempos de implementación elevados que derivan en proyectos poco rentables
- Esquemas de financiamiento inexistentes o inadecuados. - Resultados obtenidos inferiores a los esperados y poco predecibles.
- Rápido nivel de obsolescencia de las TICs que deriva en la necesidad de inversiones continuas que pierden valor rápidamente.
- Tecnología poco flexible e inadecuada para las necesidades de la empresa.
- Infraestructura actual insuficiente para dar apoyo al uso de nuevas aplicaciones.
- Brecha digital caracterizada por la cultura digital, pobre entendimiento de los beneficios que aporta la adopción de las TICs en la PyME.

En resumen, las TIC desempeñan un papel crucial en la mejora de los procesos de toma de decisiones en las PyMEs; estas tecnologías incluyen sistemas informáticos, software de gestión, redes de comunicación y dispositivos móviles, entre otros. Al aprovechar las TICs, las PyMEs

pueden recopilar y analizar grandes cantidades de datos, lo que les permite tomar decisiones basadas en información precisa y actualizada; además, las TICs facilitan la comunicación y colaboración interna, así como la interacción con proveedores, clientes y otros actores externos. No obstante, se puede apreciar que es necesario aportar herramientas y metodologías más sencillas, a fin de disminuir la brecha existente entre la infraestructura que se presenta entre una multinacional y una pequeña empresa.

### **Tecnologías digitales emergentes**

Hoy en día la literatura revela que el foco de una gran revolución está en las tecnologías digitales emergente y asociadas a conceptos tales como Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0; estas se concentran en la analítica de grandes datos, la inteligencia artificial, internet de las cosas, y la robótica avanzada etc. (N. CEPAL, 2021). Las tecnologías digitales y las redes sociales crean nuevos espacios de comunicación y encuentro; también las personas, actores sociales y políticos, se relacionan y entran en interconexión (Mossberger et al., 2008). Esto despierta la apertura de espacios y diversas posibilidades de participación digital, de manera más accesible, instantánea, continuada, igualitaria y personalizada (Buckingham, 2005). Estos cambios y su aplicación en las empresas pueden generar ahorro de tiempos e insumos, optimizando la información para la toma de decisiones y la posibilidad de predecir problemas (Motta et al., 2019).

Adicionalmente, otro beneficio vinculado a la formación de capacidades dinámicas se refiere a las posibilidades de reorganización de capacidades y estrategias de innovación para añadir valor a los productos y servicios que brindan las PyMEs (Casalet y Stezano, 2021). El concepto de tecnologías digitales hace referencia a un conjunto amplio y heterogéneo de modalidades de uso de estas tecnologías. Existen dos tipos de clasificaciones para el concepto de tecnología

digital: por un lado, el nivel básico es el que está asociado a tecnologías más bien maduras, cuyo uso no determina necesariamente reestructuraciones importantes en las empresas que las adopta. Al extremo opuesto, el nivel que se denomina “de frontera”, corresponde a tecnologías más modernas, cuya incorporación en la estrategia empresarial requiere de ajuste profundos, especialmente en su organización, sistemas productivos, en las relaciones con clientes y proveedores y modelos de negocio (N. CEPAL, 2021). A continuación se describe casa una de las tecnologías emergentes de frontera.

Tipo de uso	Descripción	Beneficios potenciales para las empresas
Análítica de grandes datos	Análisis de datos caracterizados por un gran volumen, velocidad y variedad de fuentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño mejorado a través de algoritmos avanzados.</li> <li>- Resulta relevante para tomar decisiones en tiempo real</li> <li>- Mejor diseño y ejecución de proyectos de marketing.</li> <li>- Capacidad para prever e identificar tendencias.</li> </ul>
Fabricación aditiva o 3D	Hace referencia a técnicas de producción por adición de material, por ejemplo las impresiones en 3D.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite producir nuevos componentes y productos finales complejos y durables.</li> <li>- Permite el diseño de prototipos de forma rápida y menos costosa.</li> <li>-Nuevos modelos de negocios.</li> </ul>
Inteligencia artificial (IA)	La IA es la capacidad de las máquinas y los sistemas para adquirir y aplicar conocimientos, incluso mediante una amplia variedad de tareas cognitivas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejoras en el control de calidad.</li> <li>- Automatización de la toma de decisiones.</li> <li>- Mayor eficiencia.</li> <li>- Reducción de errores relacionados con la recopilación y análisis de grandes cantidades de datos.</li> </ul>
Robótica avanzada	Se relaciona a la incorporación de automatización inteligente en equipos de producción, por ejemplo, robots con fuerte autonomía a nivel de toma de decisiones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brinda total transparencia, lo que permite a los compradores y vendedores efectuar la trazabilidad de bienes digitales.</li> <li>- Las empresas mas pequeñas pueden obtener información confiable a menor costo.</li> </ul>
Internet de las cosas	Implica la comunicación ampliada entre máquinas, personas y productos, permitiendo la toma de decisiones y la ejecución de tareas en relación con la información que la tecnología almacena.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minoristas: permite ofrecer productos a medida.</li> <li>- En producción: anticipa la sustitución de inventario.</li> <li>- En logística: permite calcular mejores rutas de entrega.</li> <li>- Una relación mas directa con los clientes.</li> </ul>

Cuadro 2.4: Descripción de tecnologías digitales de frontera. Fuente: CEPAL elaborado en base a Cetic.br (2019) y Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2020).

En resumen, la Tecnología Digital tiene el potencial de contribuir de manera significativa a

promover las tres dimensiones del desarrollo sostenible: crecimiento, igualdad y sostenibilidad. Sin embargo, las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) se enfrentan a desafíos y presiones competitivas, ya que deben mantenerse actualizadas tecnológicamente para no perder su posición en el mercado; además, a menudo carecen de la infraestructura necesaria para implementar este tipo de tecnología. Por lo tanto, es crucial proporcionar herramientas que faciliten el camino hacia la adopción de estas tecnologías. A partir de allí, interesa el estudio comparativo del tipo de tecnología Inteligencia Artificial con el modelo propuesto en esta Tesis; especialmente se realiza este estudio a partir de la herramienta Clustering.

Algoritmo Clustering – K-Means: La agrupación en clústeres es una herramienta útil en la ciencia de datos; es un método para encontrar la estructura de clustering en un conjunto de datos que se caracteriza por la mayor similitud dentro del mismo clustering y entre diferentes clusters. Esta metodología se clasifica en tres tipos: en primer lugar, el aprendizaje supervisado. (Russell y Norvig, 2004) usa técnicas para deducir una función a partir de datos de entrenamiento. El objetivo es predecir el valor correspondiente a cualquier objeto de entrada a partir de los datos de entrenamiento que ha visto previamente. Otro tipo de aprendizaje es el no supervisado, el cluster jerárquico fue el primer método de agrupamiento utilizado por biólogos y científicos sociales, mientras que el análisis de clustering se convirtió en una rama del análisis multivariado estadístico (Kaufman y Rousseeuw, 2009). Este es un enfoque de aprendizaje no supervisado para el aprendizaje automático; es decir que sólo se cuenta con datos de entrada, sin asociarlos a una salida deseada. En este trabajo, cuando se lleva a cabo el estudio comparativo con el modelo propuesto, se concentra en el tipo de aprendizaje no supervisado.

#### 2.2.4. Estado de la Práctica

En este apartado se describen las aplicaciones que existen en la actualidad en las que se aplicaron los conceptos presentados en el estado del arte.

##### Software de optimización

En cuanto a los softwares para resolver CLSP utilizando programación entera, los softwares más populares son:

- CPLEX ([www.ilog.com](http://www.ilog.com)): resuelve problemas de programación de enteros, problemas de programación lineal muy grandes utilizando variantes primarias o duales del método símplex, convexa y no convexa, y problemas de restricción cuadrática convexa (Mittelman, 2007).
- XPRESS-MP ([www.dash.co.uk](http://www.dash.co.uk)): es un solucionador de optimización comercial para programación lineal (LP), programación lineal entera mixta (MILP), programación cuadrática convexa (QP), programación cuadrática restringida cuadráticamente convexa (QCQP), programación de cono de segundo orden (SOCP) y su contrapartes enteras mixtas (Shinano et al., 2018).
- Bbc-prod (desarrollado por Belvaux & Wolsey y actualizado en un marco completo para resolver problemas utilizando el solucionador de programación entera XPRESS-MP).

Estos softwares tienen un costo de adquisición elevado para la infraestructura de las Pequeñas y Medianas Empresas; por otro lado, estos ejecutan métodos heurísticos para obtener una única y buena solución para el problema del dimensionamiento de lote. En la actualidad, diversas empresas de distintos sectores y tamaños han adoptado tecnologías de información (TICs) para optimizar sus procesos logísticos en cuanto al abastecimiento de materiales. A continuación, se presentan algunos de los software más utilizados en esta área.

E-PROCUREMENT: Se puede describir como una herramienta que automatiza los procesos tácticos y el flujo de información asociados con el aprovisionamiento (Stadler, 2002). VMI

(Inventario administrado por el proveedor) y CRP (Programa de reabastecimiento continuo): son sistemas de aprovisionamiento que se basan en el intercambio de información a través de Internet. En estos sistemas, el propio proveedor se encarga de gestionar los niveles de stock de su cliente empresarial y genera los pedidos correspondientes (Inza, 2006).

ERP (Enterprise Resource Planning): es un sistema de información utilizado para planear e identificar los amplios recursos empresariales necesarios para tomar, procesar, embarcar y contabilizar las órdenes del cliente (Heizer y Render, 2004). A partir de este concepto se desarrolla un programa de software diseñado para gestionar de manera integrada las funciones de una empresa (Berenguer y Ramos, 2003), por ejemplo SAP el principal proveedor de ERP a nivel mundial, lo define como una arquitectura de software empresarial que facilita e integra información entre las áreas de fabricación, logística, finanzas y recursos humanos. A pesar de sus beneficios, el uso de ERP presenta algunas desventajas significativas. En primer lugar, implica grandes inversiones de dinero debido a los costos asociados con la adquisición del software, su implementación y la formación del personal. Además, los proyectos de implementación de ERP a menudo se enfrentan a altos porcentajes de fracaso (Camizán Lozano, 2017); esto puede atribuirse a la falta de construcción de los procesos de negocio para adaptarse al nuevo sistema y a una gestión inadecuada del cambio en la cultura organizacional.

WMS (Warehouse Management System): Es un subsistema de información que ayuda en la administración del flujo del producto y el manejo de las instalaciones en la red logística. Además, se considera que controla las operaciones que alimentan la materia prima y los componentes al proceso de producción, y atiende las órdenes de pedidos de los clientes (Bartholdi III y Hackman, 2008). Las desventajas que presenta el WMS, son los altos costos de implementación debido a la capacidad de procesamiento de este software y la necesidad de reestructuración del proceso de almacenamiento.

MRP I y MRP II: El MRP I (Planificación de requisitos de materiales) es una técnica utilizada para calcular la demanda interna y se considera como un software para la planificación y control de la producción y las compras. Este sistema mejora la eficiencia y eficacia de la logística interna al permitir lo siguiente: a) analizar los requisitos de componentes de cada producto; b) tener en cuenta el nivel de inventario de cada componente; c) considerar los plazos de entrega; d) generar informes sobre los elementos que deben comprarse o fabricarse, cuándo deben implementarse las órdenes de producción o pedidos, y qué órdenes deben reprogramarse o anularse. Además, cuenta con módulos de planificación de capacidad, CRP (Capacity Resource Planning), y aplicaciones financieras (Berenguer y Ramos, 2003).

Es interesante reflexionar sobre el impacto de estas tecnologías en las empresas. Efectivamente, la implementación de soluciones como e-procurement, ERP, MRP I y MRP II ha demostrado en su mayoría beneficios significativos en empresas multinationales, como la reducción de costos, la mejora en el flujo de información y los resultados de los procesos. No obstante, las PyMEs suelen tener presupuestos más ajustados en comparación con las grandes empresas, lo que dificulta la inversión en soluciones tecnológicas costosas. Además, pueden carecer de personal especializado en tecnología de la información para gestionar la implementación y el mantenimiento de estas soluciones. Por otra parte, la cultura organizacional existente puede resistirse al cambio y presentar desafíos para adaptarse a las nuevas tecnologías. La falta de una reestructuración adecuada de los procesos también puede ser un obstáculo, ya que estas soluciones suelen necesitar cambios en la forma en que se realizan las tareas y se gestionan los recursos. Si los procesos no se ajustan de manera adecuada, los beneficios esperados no pueden materializarse plenamente. Otro desafío importante es la falta de confianza entre las empresas, especialmente en el caso de soluciones como el VMI y el CRP, donde se delega la gestión de inventarios y pedidos a los proveedores. Esta falta de confianza puede generar reticencia por

parte de las empresas para adoptar estas prácticas. En resumen, si bien estas tecnologías ofrecen muchas ventajas, es esencial abordar los obstáculos mencionados, como los altos costos, la cultura organizacional, la reestructuración de procesos y la construcción de confianza, para garantizar una implementación exitosa y aprovechar al máximo sus beneficios potenciales.

### **Tecnologías avanzadas en empresas**

A continuación, se analiza el nivel de adopción de tecnologías digitales más avanzadas en empresas de cuatro países latinoamericanos: Brasil, Chile, Ecuador y México. Se realizó este estudio ya que en estos países se han realizado encuestas recientes que ofrecen indicadores de uso de las tecnologías digitales. Las encuestas abarcan, según el caso, algunos indicadores de tecnologías avanzada o de frontera. Por otra parte, en estos países se encuentran economías de diverso tamaño, según el informe realizados por los autores Dini et al., (2021), indica que representan el 59,1 % de la población y el 61,7 % del Producto Interno Bruto de América Latina y el Caribe.

#### Argentina

En el caso de Argentina, el estudio que realizó incluye a 30 empresas principalmente vinculadas al sector industria de las provincias posicionadas en los primeros puestos sobre el gran aporte que hacen al crecimiento económico. Pero en este grupo solamente 15 PyMEs son usuarias e implementaron nuevas tecnologías digitales, el resto son proveedores locales de tecnologías, además de un emprendimiento de base tecnológica. Entre las actividades analizadas se encuentran el sector automotriz, alimenticio, electrónica, industria plástica, óptica, maquinaria, metalmecánica, equipamiento médico y equipamiento eléctrico. En la muestra analizada la mayoría de las empresas tiene más de 20 años de antigüedad, y sólo tres empresas han sido fundadas en las últimas dos décadas. Los tamaños también presentan bastante variabilidad se-

gún cantidad de ocupados, las empresas entrevistadas tienen desde 5 hasta 380 operarios, con un tamaño promedio de 130 por empresa. Las tecnologías adoptadas por las empresas varían: en Argentina, de los 15 casos analizados existían ocho proyectos de sensores e Internet de las cosas, cuatro de sistemas con inteligencia artificial, tres proyectos de robótica avanzada, tres incorporaciones de computación en la nube y una ejecución de impresión aditiva. Entre estos proyectos se encuentran la incorporación de software para captar de datos de producción en tiempo real, sistemas de monitoreo y control de la producción y almacenamiento, sistemas digitalizados y optimizados de recolección (picking), software de pedidos para la provisión de materiales y ordenes de trabajo de producción. En materia de sistemas con inteligencia artificial, estos incluyen software que ya viene incorporado en algún tipo de maquinaria y en la gestión de tareas de mantenimiento de activos en tiempo real. Los proyectos de robótica avanzada tienen aplicaciones en el área de almacenamiento, de producción y calidad. Las soluciones de computación en la nube se vinculan principalmente al manejo contable-administrativo. Finalmente, la impresión 3D se usa especialmente para producción de prototipos.

#### Brasil

El estudio del caso brasilero se realiza sobre la base de los resultados de la encuesta TIC Empresas 2019 del Centro Regional de Estudios para el Desarrollo de la Sociedad de la Información Cetic.br (2019). La encuesta analizó a 7.000 PyMEs, afines a los siguientes sectores de actividad: industria de transformación; construcción; comercio y reparación de vehículos; transporte, almacenaje y correo; alojamiento y alimentación; información y comunicación; actividades inmobiliarias, profesionales, científicas, técnicas y administrativas junto con sus servicios complementarios; y finalmente arte, cultura, deporte, recreación, y otros servicios. La información ofrecida por Cetic.br en cuanto a los niveles de adopción de las tecnologías de última generación, la encuesta abarca aquellas empresas que cuentan con un área o departamento

de tecnologías de la información (TI). Los resultados en general fueron que los niveles de adopción parecen ser escasos: solo el 8 % de las empresas cuentan con un área TI hacen uso del Big Data, solo un 5 % hace uso de impresión 3D, y solo un 3 % y 2 % hacen uso de robótica a nivel industrial y de servicios, respectivamente. Se concluye que estas cifras parecen ser bajas, especialmente porque están calculadas sobre el universo de empresas con área TI, por lo que, con respecto al universo total de empresas, los niveles de adopción serán sensiblemente menores.

#### Chile

El análisis del caso chileno se ha basado en los resultados de la Encuesta de Acceso y Uso TIC en Empresas, año de referencia 2018, desarrollada por el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo en conjunto con el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Se realizaron las encuestas a las empresas que desarrollan su actividad económica principal en alguno de los sectores productivos definidos en base a la Clasificación Internacional Industrial Uniforme de Naciones Unidas (CIIU Rev.), en su adaptación local (CIIU.CL 2012). Los resultados obtenidos reflejaron que se encuentran más desarrollados los usos de aplicaciones ERP (Enterprise Resources Planning) obteniendo el 22 % y de Cloud Computing el 18 %, y en mucha menor medida, el uso de herramientas de gestión empresarial del tipo de SCM (Supply Chain Management), CRM (Customer Relationship Management). Por otro lado, si bien la mayor parte de las PyMEs chilenas se encuentran conectadas, sin embargo, no parecen estar haciendo un uso intensivo de estas tecnologías. Las encuestas también relevan información acerca del nivel de uso de una de las herramientas clasificadas como tecnologías de frontera, el Big Data, solamente utilizada por el 1.7 % de las PyMEs chilenas, por lo que su difusión es prácticamente inexistente en este tipo de empresas. Resulta evidente que existen importantes brechas entre las PyMEs y grandes empresas, particularmente en torno a usos de aplicaciones de ERP y Cloud Computing, además de algunos aspectos relativamente poco sofisticados como son el uso de las redes sociales o contar

con un sitio web.

#### Ecuador

La fuente de datos para el análisis de Ecuador proviene del Módulo TIC de la Encuesta Estructural Empresarial 2018 del Instituto Nacional de Estadística y Censos. Se entrevistaron un total de 4.088 empresas vinculadas a los siguientes sectores industriales: manufactura, minería, comercio, construcción y servicios; en esta oportunidad, un gran uso de tecnologías digitales fue para Cloud Computing en las empresas medianas de Ecuador. Por el contrario, las tecnologías de gestión del tipo ERP, CRM u otras, así como el uso de servidores o de la intranet, tienen un bajo nivel de difusión. Cabe mencionar que, con la excepción del uso de la intranet, no se vislumbran mayores diferencias en términos de adopción y uso de estas tecnologías entre ambos tipos de empresas medianas. Sin embargo, un aspecto que distingue a ambos grupos de empresas: mientras que solo el 32 % de las medianas han declarado invertir en tecnologías de información y comunicación (TIC) en 2018, Por otra parte, cuando se compara el nivel de adopción tecnológico y del uso de herramientas y soluciones digitales de las empresas medianas con el de las empresas grandes, se puede percibir que en la mayor parte de los casos existen importantes brechas.

#### México

Para analizar el caso de México se consideraron los datos del Censo Económico 2019 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEG, 2019) y la Cuarta Encuesta 2019 de Usuarios de Servicios de Telecomunicaciones para Micro, Pequeñas y Medianas Empresas, desarrollada por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT, 2019). Gracias a los datos extraídos por las fuentes analizadas, se evaluó acerca de usos más sofisticado de las tecnologías digitales a nivel de microempresas y PyMEs mexicanas. La encuesta tuvo lugar a 1.582 entrevistas focalizadas en los sectores económicos con mayor participación de unidades económicas fijas,

según el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2013. También, las empresas mexicanas cuentan en general con importantes niveles de acceso a internet, el uso que hacen del mismo parece ser de baja sofisticación. En particular, a medida que el análisis se focaliza en niveles de uso más avanzado, los indicadores de uso relevados se reducen considerablemente y las brechas entre agentes y entre países se agranda. Así mismo, se sintetizan los principales resultados de investigaciones de campo que identifican los elementos que estimulan y obstaculizan la digitalización de empresas manufactureras de algunas localidades de la región.

### **2.3. Conclusiones parciales del análisis del Marco Teórico-Referencial**

La revisión bibliográfica presentada revela que no existen estudios que consideren el recuento exhaustivo de todas las opciones de pedido en el problema del tamaño de lote. Además, ninguna de las investigaciones empíricas y teóricas se ha centrado en explorar las relaciones entre el tamaño de los grupos de pedidos y los costos totales. Este trabajo es uno de los primeros intentos de estudiar un problema de producción basado en estos supuestos. Por otro lado, se observa que las PyMEs, son el motor de la economía del país, por ende, estas empresas influyen en gran porcentaje en el PBI y por lo tanto en el crecimiento económico. También se pudo apreciar que Mendoza se encuentra en los primeros puestos del total de PyMEs a nivel país. Sin embargo, los rápidos avances tecnológicos hacen que las ventanas de oportunidad sean más pequeñas y en la medida, que las PyMEs no destinen recursos para llevar a cabo nuevos procesos productivos e incorporar tecnología moderna, las tasas de crecimiento futuras serán sustancialmente menores. Por otro lado, no se ha encontrado información relevante acerca del estudio del dimensionamiento de lote, a través comportamiento de clusters desde el punto de

vista de la Física. Esto motivó, a la creación de un nuevo modelo para el problema del tamaño de lote, a partir del análisis de los agrupamientos y, de esta manera interpretar las diferentes características que arrojan los tamaños de lote cuando adquieren determinada forma según como estén agrupados, para luego obtener soluciones óptimas. También, esta nueva herramienta que sea flexible a la adaptación de tecnología digital para el fortalecimiento de pequeñas industrias regionales.

## **Capítulo III**

# **METODOLOGÍA Y RESULTADOS**

Se pudo observar en el Capítulo 2 en el marco teórico referencial, la importancia de conocer la forma óptima de obtener los suministros necesarios para la planificación de los requerimientos de materiales en los procesos de producción y los servicios. Este proceso debe hacerse en función del costo mínimo en vistas de poder optimizar el sistema minimizando los costos totales. Definir el tamaño de lote de producción más adecuado es un problema común y uno de los más complejos en un sistema de fabricación. Su complejidad depende de varios elementos que deben tenerse en cuenta en el análisis. El estudio presentado en este trabajo es una de las primeras investigaciones que se centra específicamente en un modelo matemático relacionado con el recuento exhaustivo de todas las opciones de pedido en el problema del tamaño de lote.

La metodología utilizada en este trabajo es la siguiente:

- Se empleó un enfoque cuantitativo para un problema de tamaño de lote en la MRP.
- Las hipótesis y variables se definieron en términos de un problema de dimensionamiento de lotes en un sistema de producción de un solo artículo y una sola etapa en un horizonte de planificación finito.
- Se tuvieron en cuenta dos supuestos para el comportamiento de los requerimientos de materiales en cada periodo. Por un lado, se analizaron los tamaños de los pedidos al mantener la cantidad de requerimientos en cada periodo constantes. Se denominó Sistema Homogéneo. Por otro parte, se estudiaron los agrupamientos cuando la cantidad de requerimientos en cada periodo es variable. Lo denominó Sistema Heterogéneo.
- Se analizaron y enumeraron todas las combinaciones posibles de pedidos de materiales en un horizonte de planificación finito.
- Se desarrolló un algoritmo para calcular el costo total vinculando los tamaños del grupo de pedidos y los costos de preparación y mantenimiento para cada una de las combinaciones posibles. También, se desarrolló un modelo matemático teniendo en cuenta las mismas variables en

sistemas homogéneos.

- Los costos totales se relacionaron con los tamaños de los grupos de pedidos para analizar su comportamiento.
- Se utilizó un caso de estudio para profundizar el alcance del modelo propuesto.
- Se validó el modelo a través del comportamiento de un sistema elástico y se construyó un modelo matemático.
- Se compararon los resultados con la metodología de Inteligencia Artificial - Machine Learning
- Se realizó el estudio de similitud entre el comportamiento de Clustering y tamaño de lote.
- Se construyó una plataforma digital para la obtención de políticas de pedidos óptimas adaptado a PyMEs.

### **3.1. Modelo propuesto**

En este apartado se identifican y describen suposiciones, índices y las variables que definen el sistema; de esta manera, se pretende expresar las características o atributos que tienen en común, asumiendo las particularidades del presente trabajo. Este paso es de suma importancia ya que toda investigación requiere una clara comprensión de las variables de estudio. Así, se permite al investigador conocer lo que va a manipular y los efectos producidos con los cambios provocados.

#### **3.1.1. Bases y supuestos de partida**

- Se conocen las demandas para cada artículo y cada periodo.
- Los requerimientos en cada periodo se conforman por un tipo de artículo.

- Cada pedido se recibe en su totalidad al comienzo del periodo determinado.
- El costo almacenamiento de inventario unitario por periodo de tiempo es conocido y constante (no depende del precio unitario).
- El horizonte de planificación es conocido y finito.
- El valor inicial en el inventario es cero.
- Todos los requerimientos deben cumplirse al final del plan.
- La preparación del pedido tiene un valor por cada pedido que se realiza.

### 3.1.2. Variables

$N$ : Horizonte de planificación.

$\alpha_i$ : Materia prima requerida para cada periodo  $i$ .

$a_{jk}$ : Número de periodos a satisfacer para cada orden de compra de cada  $j$ .

$Np_j$ : Número total de pedidos para la combinación  $j_{th}$ .

### 3.1.3. Índices

$i$ : Cada uno de los periodos  $i, \dots, N$ , donde  $N$  es el horizonte de planificación.

$j$ : Cada una de las formas en las que se puede realizar el pedido de compra.

$k$ : Números de agrupamientos en cada combinación  $j$ .

### 3.2. Análisis de todas la formas de realizar los pedidos

A partir de la hipótesis establecida, se plantea un análisis exploratorio y exhaustivo de todas las opciones - posibles de pedir- que se presentan en un horizonte de planificación. Luego se realiza una comparación con un método que es bien conocido: el algoritmo de Wagner & Whitin (*W&W*). Como se mencionó en el Marco Teórico Referencial, esta metodología es la referencia para éste análisis particular de todas las combinatorias posibles al momento de realizar los pedidos de materiales.

A partir del estudio de todas las opciones de realizar los pedidos para abastecer las necesidades de las empresas, se opta por representar este comportamiento a través de un Cuadro de doble entrada compuesta por los periodos  $i$  y las combinaciones  $j$ . Es importante asegurarse de que la matriz tenga la capacidad de representar todas las posibles combinaciones para cualquier horizonte en el que se realice la planificación. De esta manera, se puede tener una visión completa de las diferentes opciones y para esto se tienen presente dos supuestos:

- En cada fila, la sumatoria de los periodos acumulados para cada pedido debe ser igual al valor del horizonte de planificación.
- El valor de  $a_{jk}$  debe ser mayor o igual a 1 en el primer periodo.

A modo de ejemplo, se comienza con un horizonte de  $N = 2$ , recordando  $N$  es la sumatoria de todos los periodos temporales que abarca la planificación de requerimientos de materiales:

Combinación ( $j$ ) \ Periodo ( $i$ )	1	2
	1	2
2	1	1

Cuadro 3.1: Opciones para satisfacer los requerimientos netos de dos periodos, según todas las combinaciones posibles.

A continuación, se describen dos formas posibles de realizar los pedidos para el horizonte de planificación en estudio. Esta interpretación se observa en el Cuadro 3.2:

- Realizar un único pedido en el primer periodo con el objeto de satisfacer las necesidades de los periodos 1 y 2.
- Realizar un pedido en el primer periodo para cubrir las necesidades de dicho periodo y luego hacer un pedido en el segundo periodo para satisfacer las necesidades de ese periodo.

De la misma manera, se estudia que sucede cuando el tamaño del sistema es  $N = 3$ :

Combinación ( <i>j</i> )	Periodo ( <i>i</i> )		
	1	2	3
1	3	0	0
2	2	0	1
3	1	2	0
4	1	1	1

Cuadro 3.2: Opciones para satisfacer los requerimientos netos de tres periodos, según todas las combinaciones posibles.

Se puede observar en el Cuadro 3.2, el total las combinaciones posibles para realizar los pedidos que satisfacen al horizonte de planificación  $N = 3$ :

- Realizar un único pedido en el primer periodo con el objeto de satisfacer las necesidades de los periodos 1, 2 y 3.
- Realizar un pedido en el primer periodo para satisfacer las necesidades del periodo 1 y 2, luego hacer un pedido en el tercer periodo para satisfacer las necesidades de dicho periodo.

- Realizar un pedido en el primer periodo para cubrir las necesidades del mismo periodo y luego hacer un pedido en el segundo periodo para satisfacer las necesidades de los periodos 2 y 3.
- Por último, realizar un pedido en cada uno de los periodos para satisfacer dicho periodo.

Para terminar, se analiza el caso en el que el horizonte de planificación tiene un tamaño de  $N=4$

Combinación ( $j$ )	Periodo ( $i$ )			
	1	2	3	4
1	4	0	0	0
2	3	0	0	1
3	2	0	2	0
4	2	0	1	1
5	1	2	0	1
6	1	1	2	0
7	1	3	0	0
8	1	1	1	1

Cuadro 3.3: Opciones para satisfacer los requerimientos netos de cuatro periodos, según todas las combinaciones posibles.

En el Cuadro 3.3, se puede constatar la presencia de 8 alternativas posibles para cuando el horizonte de planificación es  $N = 4$ .

A modo resumen, en este ejemplo, se aplica la misma lógica de interpretación de los casos anteriores para cada combinación en el momento de realizar los pedidos que abastecerán a cada periodo.

Previamente, se observa lo que sucede cuando se consideran todas las opciones de pedido para sistemas de  $N = 2$ ,  $N = 3$  y  $N = 4$ . Se puede interpretar, que el resultado obtenido del análisis de todas las alternativas posibles de realizar los pedidos para abastecer un horizonte de planificación, presentan un crecimiento a medida que se incrementa el tamaño del sistema. A partir de aquí, se procede a analizar si hay algún patrón o secuencia en un conjunto específico

de números, es decir, si hay una sucesión que se puede identificar a medida que se amplía el horizonte de planificación.

Dados los diferentes tamaños de sistemas estudiados  $N = 1$ , (no se la analizó ya que resulta evidente que existe solo una combinación posible),  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$ , la progresión obtenida a partir de la exploración de todas las formas posibles de hacer los pedidos, resulta: 1, 2, 4, 8.

Se puede notar, que si se divide cada término entre el término anterior; el resultado de todas las divisiones es 2:

$$\frac{8}{4} = 2 \quad (3.1)$$

$$\frac{4}{2} = 2 \quad (3.2)$$

$$\frac{2}{1} = 2 \quad (3.3)$$

Con esto se confirma que se trata de una progresión geométrica, cuya razón común ( $r$ ) es igual 2. Por lo tanto según (Oteyza, Osnaya, Garciadiego, y Hoyo, 2001), este comportamiento responde a la formula:

$$a_n = ar^{N-1} \quad (3.4)$$

Donde:

- $a_n$  es el término general.
- $a$  es el primer término.

- $N$  es el número de términos.
- $r$  es la razón común.

De ahora en adelante, a partir de la Ec. 3.4, se describe la expresión que define la cantidad de las alternativa posibles de realizar los pedidos en un horizonte de planificación. Teniendo en cuenta que  $a_n$  es la cantidad total de combinaciones a estudiar,  $a$  es el primer valor de la progresión,  $a = 1$ , ya que se empieza con un horizonte de planificación  $N = 1$ . Por último  $r = 2$  que resulta de la división obtenida entre los valores dados de la sucesión. Por lo que resulta:

$$2^{N-1} \tag{3.5}$$

En conclusión, la Ec. 3.5, permite conocer, la cantidad de combinaciones a estudiar en un horizonte de planificación.

### 3.2.1. Representación de Todas las Combinaciones Posibles

Como ya se mencionó, la interpretación de cada combinación de pedidos para un horizonte de planificación se lleva a cabo a través de la creación de una tabla de doble entrada, la cual permite una visualización y análisis más detallado de Todas las Combinaciones Posibles (TCP). Esta herramienta es fundamental para alcanzar uno de los principales objetivos de esta Tesis: comprender el comportamiento de los tamaños de agrupamientos en los periodos acumulados. El Cuadro 3.4 muestra una representación genérica de determinadas formas de realizar los pedidos de insumos para un horizonte de planificación:

En el Cuadro 3.4 se pueden apreciar dos situaciones elementales que se denominan casos extremos; la combinación  $j = 1$  y  $j = 2^{N-1}$ . En el caso extremo  $j = 1$ , se abastece cada uno

Combinación $j$	Periodo $i$						
	1	2	3	...	N-1	N	$Np_j$
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	...	$\alpha_{(N-1)}$	$\alpha_N$	
1	1	1	1	...	1	1	N
2	1	1	1	...	2	0	N-1
⋮							
j-1	N-1	0	0	...	0	1	2
j	N	0	0	...	0	0	1

Cuadro 3.4: Representación de las opciones de pedido  $j$  para un sistema de tamaño  $N$ .

de los periodos en el tiempo correspondiente, lo que se refleja en una cantidad de pedidos igual al tamaño del sistema, por lo tanto  $Np_j = Np_1 = N$ . Además, el tamaño de agrupamiento en esta combinación es  $a_{jk} = a_{11} = a_{12} = a_{13} = a_{1(N-1)} = a_{1N} = 1$ . Esto significa que para satisfacer los requerimientos  $\alpha_i$ , se realizan las órdenes de pedidos en cada periodo  $i$ . En la última combinación  $j$  del Cuadro 3.4 se presenta una opción extrema para abastecer una cantidad determinada de periodos con un solo pedido  $Np_j = 1$ , donde solo se realiza un pedido  $a_{jk} = a_{j1} = N$ , lo que indica que el tamaño de agrupamiento es  $N$ . Sin embargo, existen muchas otras opciones posibles entre estos dos límites. Por tal motivo, se tiene la curiosidad por conocer e interpretar las combinaciones que existen entre estos casos extremos.

### 3.2.2. Algoritmo de Wagner y Whitin vs TCP

Como se mencionó en el Marco Teórico Referencial, se toma como punto de partida el algoritmo de  $W\&W$  para examinar más detalladamente todas las opciones al realizar pedidos.

Las combinaciones de pedidos analizadas por el algoritmo de  $W\&W$  viene dada por (Wagner y Whitin, 1958):

$$\frac{N(N + 1)}{2} \tag{3.6}$$

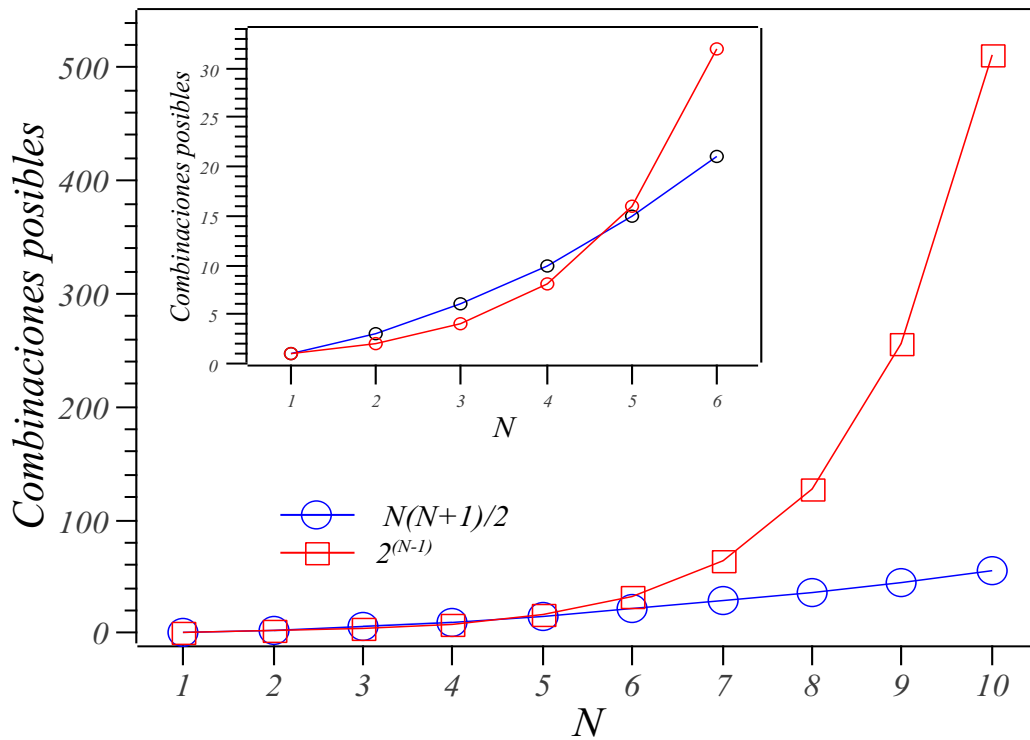


Figura 3.1: Comparación entre la cantidad de opciones propuestas por el modelo TCP y las generadas por el algoritmo  $W\&W$ ; en función del tamaño del sistema ( $N$ ).

Este algoritmo explora, analiza y descarta algunas formas de realizar pedidos hasta encontrar una solución única que resulte en el menor costo posible. No obstante, en esta Tesis, el interés es examinar y analizar todas las opciones para realizar pedidos y abastecer los periodos del sistema de manera efectiva, sin descartar ninguna opción. De esta manera, se obtiene información pertinente en el estudio de los tamaños de agrupamientos. A modo de resumen, la Figura 3.1 compara la cantidad de opciones propuestas entre el algoritmo de  $W\&W$  y el método que analiza TCP. En el eje de las abscisas se representa la cantidad de periodos, mientras que en el eje de las ordenadas se observa la cantidad de formas posibles de pedir. Se puede apreciar que

a partir de  $N = 5$  las cantidades de opciones de pedido de todas las combinaciones posibles son mayores que las consideradas por el algoritmo de  $W\&W$ . A medida que el valor de  $N$  aumenta, esta diferencia se incrementa y se aprecia con mayor facilidad que existen formas de pedir que el algoritmo de  $W\&W$  no incluye y que sería interesante explorar (véase Cuadro 3.5).

Tamaño del Sistema ( $N$ )	Cantidad de combinaciones en $W\&W$	Cantidad de combinaciones en TCP	TCP- $W\&W$
1	1	1	
2	3	2	
3	6	4	
4	10	8	
5	15	16	1
6	21	32	11
7	28	64	36
8	36	128	92
9	45	256	211
10	55	512	457
11	66	1024	958
12	78	2048	1970
13	91	4096	4005
14	105	8192	8087
15	120	16834	16264

Cuadro 3.5: Cantidad total de las opciones de pedido para satisfacer diferentes tamaños del sistema ( $N$ ), según  $W\&W$  y todas las combinaciones posibles (TCP).

Como se expuso en el Capítulo 2, es importante tener en cuenta que no hay información relevante sobre el estudio de todas las formas de pedir y el impacto del comportamiento de los agrupamientos de pedido en el dimensionamiento del lote. A partir de entonces, se decide llevar a cabo un análisis exhaustivo de todas las combinaciones posibles en un horizonte de planificación para determinar qué el tamaño de agrupamiento es el predominante. Entonces, resulta interesante identificar sí, para una relación de costos determinada, existe una combinación de tamaños de agrupamientos que resulte en un menor costo y que aparezca con mayor frecuencia.

### 3.2.3. Construcción de matriz para Todas las Combinaciones Posibles

Se pudo observar previamente que al aumentar el horizonte de planificación, el número total de combinaciones aumenta exponencialmente. Por lo tanto, la matriz necesaria para la construcción también crecerá exponencialmente. A partir de ahora, se comienza el desarrollo de la matriz de forma eficiente. Uno de los criterios para abordar este problema como se vio en la sección anterior, es que la sumatoria de los elementos de cada fila sea igual al tamaño del sistema. Este criterio puede ser válido, sin embargo existe un tipo de limitación ya que se requiere mucho tiempo de cálculo computacional. Entonces, observando el comportamiento de las columnas de la tabla, encontramos un patrón que permite la construcción de la misma. Por lo tanto, se desarrolla un programa computacional para la construcción de la matriz. A modo recordatorio se menciona que la exploración de todas las posibles combinaciones de pedidos es el punto de partida para el análisis de los agrupamientos con sus costos asociados. Considerando como ejemplo un sistema de tamaño  $N = 5$  para demostrar la elaboración de una tabla que simplifica la interpretación del algoritmo desarrollado (véase el Cuadro 3.6).

Es posible apreciar que existen 16 combinaciones posibles en este ejemplo; se recuerda que este término viene dado por  $2^{N-1}$ . A continuación se explica cómo se arma la matriz, detallando el contenido de cada columna.

- Primera columna:

- Las filas que se llenan con el valor 1 son generadas a partir de la fórmula  $2^{N-2}$ . Por ejemplo, en el caso presentado, al tener un sistema de tamaño  $N = 5$ , se obtiene  $2^{5-2} = 8$ . Por lo tanto, las primeras 8 filas se llenan con el valor 1.
- Por otro lado, las filas que se completan con el valor 2 se obtienen utilizando la fórmula  $2^{N-3}$ . En este caso, como el tamaño del sistema es  $N = 5$ , el valor obtenido es  $2^{5-3} = 4$ ,

Combinaciones / Periodos	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	0
3	1	1	2	0	1
4	1	1	3	0	0
5	1	2	0	1	1
6	1	2	0	2	0
7	1	3	0	0	1
8	1	4	0	0	0
9	2	0	1	1	1
10	2	0	1	2	0
11	2	0	2	0	1
12	2	0	3	0	0
13	3	0	0	1	1
14	3	0	0	2	0
15	4	0	0	0	1
16	5	0	0	0	0

Cuadro 3.6: Patrón de comportamiento de las columnas para el cálculo de todas las opciones de pedir cuando  $N = 5$ .

es decir las siguiente 4 filas se llenan con el valor 2;

- Las filas siguientes se completan con el número 3 debido a que el horizonte de planificación es de 5 y se ha obtenido un valor de 2 a partir de la fórmula  $2^{N-4}$ . Lo que significa que las dos filas siguientes se completan con el valor 3.
- Las filas que se completan con el valor de 4 se obtienen a partir de la fórmula  $2^{N-5}$ , considerando que el horizonte de planificación es de  $N = 5$ . Dado que el resultado de la fórmula es  $2^{5-5} = 1$ , la siguiente fila se completa con el valor de 4.
- Por último, la fila última se completa con el valor del tamaño del sistema, es decir  $N$ .

- Segunda columna: se considera un nuevo tamaño del sistema,

donde  $N_1 = N - 1$ . Siguiendo el ejemplo  $N_1 = 5 - 1 = 4$ .

- Las filas que se llenan con el valor 1 son generadas a partir de la fórmula  $2^{N_1-2}$ . Por ejemplo, en la situación presentada, al tener un nuevo sistema de tamaño  $N = 4$ , se obtiene  $2^{4-2} = 4$ . Por lo tanto, las primeras 4 filas se llenan con el valor 1.
  - Por otro lado, las filas que se completan con el valor 2 se obtienen utilizando la fórmula  $2^{N_1-3}$ . En este caso, el valor obtenido es  $2^{4-3} = 2$ , es decir las siguiente 2 filas se llenan con el valor 2;
  - La fila siguiente se completa con el número 3 debido a que el nuevo tamaño del sistema  $N_1 = 4$  y se ha obtenido un valor de 1 a partir de la fórmula  $2^{N_1-4}$ .
  - Luego, la fila siguiente se completa con el nuevo valor del tamaño del sistema, es decir  $N_1$ .
  - Por último, las filas restantes se llenaran con el valor 0.
- Tercera columna: se considera un nuevo tamaño del sistema, donde  $N_2 = N - 2 = 3$ .
- Las filas que se llenan con el valor 1 son generadas a partir de la fórmula  $2^{N_2-2}$ . Por ejemplo, en el caso presentado, al tener un nuevo sistema de tamaño 3, se obtiene  $2^{3-2} = 2$ . Por lo tanto, las primeras 2 filas se llenan con el valor 1.
  - Por otro lado, las filas que se completan con el valor 2 se obtienen utilizando la fórmula  $2^{N_2-3}$ . En este caso, como el tamaño del sistema es  $N_2 = 3$ , el valor obtenido es  $2^{3-3} = 1$ , es decir la siguiente fila se llena con el valor 2.
  - Luego, la fila siguiente se completa con el nuevo valor del tamaño del sistema, es decir  $N_2$ . A partir de aquí, en el resto de las filas se produce el mismo comportamiento, por lo tanto se produce una copia.

- Luego las siguientes cuatro filas se completan con el valor 0. A partir de aquí, en el resto de las filas se produce el mismo comportamiento. Entonces se realiza una copia.
- Cuarta columna: se considera un nuevo tamaño del sistema, donde  $N_3 = N - 3 = 2$ .
- Las filas que se llenan con el valor 1 son generadas a partir de la fórmula  $2^{N_3-2}$ . En este ejemplo, al tener un nuevo sistema de tamaño 3, se obtiene  $2^{2-2} = 1$ . Por lo tanto, las primer fila se llenan con el valor 1.
  - La fila siguiente se completa con el nuevo valor del tamaño del sistema, es decir  $N_3$ .
  - Luego las siguientes dos filas se completan con el valor 0. A partir de entonces, en el resto de las filas se produce tres veces el mismo comportamiento, por lo tanto se generan tres copias.
- Quinta columna: se considera un tamaño del sistema, donde  $N_4 = N - 4 = 1$ .
- En esta columna la primer fila se completa con  $N_4$  y la segunda fila se rellana con 0, a partir de aquí se produce siete veces el mismo comportamiento hasta completar las filas, en consecuencia se originan siete copias.

A continuación, en el Cuadro 3.7, se resume en forma genérica la construcción de la matriz que expresa todas las opciones de pedidos que se pueden realizar en cualquier horizonte de planificación o tamaño del sistema.

	1	2	3	4	5	...	(N-1)	(N-1)
Variable	N	$\frac{N_1}{(N-1)}$	$\frac{N_2}{(N-2)}$	$\frac{N_3}{(N-3)}$	$\frac{N_4}{(N-4)}$	...	$\frac{N_{(N-2)}}{N-(N-2)}$	$\frac{N_{(N-1)}}{N-(N-1)}$
Filas completas con fórmula	$j$	$j * 1/2$	$j * (1/2)^2$	$j * (1/2)^3$	$j * (1/2)^4$	...	$j * (1/2)^{(N-2)}$	$j * (1/2)^{(N-1)}$
Filas que se completan con 0	-	$j * 1/2$	$j * (1/2)^2$	$j * (1/2)^3$	$j * (1/2)^4$	...	$j * (1/2)^{(N-2)}$	$j * (1/2)^{(N-1)}$
Fracción de filas completas.	$j$	$j$	$j * 1/2$	$j * (1/2)^2$	$j * (1/2)^3$	...	$j * (1/2)^{(N-3)}$	$j * (1/2)^{(N-2)}$
Copias	-	-	$(2-1)$	$(2^{2-1})$	$(2^{3-1})$	...	$(2^{(N-3)} - 1)$	$(2^{(N-2)} - 1)$

Cuadro 3.7: Patrón de comportamiento de las columnas para el cálculo de todas las opciones de pedir

En conclusión, partiendo del estudio de las columnas de la matriz que contiene todas las combinaciones posibles, a partir del patrón de comportamiento encontrado se facilita la programación. Esto permitirá obtener las tablas con mayor rapidez para cualquier tamaño del sistema.

### 3.3. Algoritmo propuesto

Tal como se evidenció en el Capítulo 2, interesa comprender el comportamiento de los tamaños de agrupamientos para todas las opciones que se presenten cuando se realizan los pedidos para abastecimiento de materiales. En este sentido, se debe hacer una estadística de cuáles son los tamaños de agrupamiento que son seleccionados con algún criterio de optimización para cada tamaño de horizonte de planificación  $N$ . El objetivo es saber si cada pedido óptimo que se encuentra -para una cantidad dada de materia prima a pedir en cada periodo-, tiene una distribución uniforme o si hay algún tamaño de agrupamiento que aparece con mayor frecuencia. Por este motivo, se construyó un programa de computadora especialmente diseñado para generar todas las combinaciones posibles de formas de pedir los insumos necesarios para los periodos

$i$  y con la capacidad de calcular los costos asociados a cada una de esas alternativas posibles. Este programa se puede apreciar en Apéndice B. El algoritmo utilizado para la construcción del programa computacional utilizado es:

- Definir un vector con  $N$  periodos;
- Definir las cantidades a pedir en cada uno de los  $N$  periodos;
- Definir los costos relacionados con el problema;
- Recorrer la tabla de todas las combinaciones posibles de pedido calculando el costo total de cada fila;
- Si el costo total es mínimo almacenar los tamaños de los grupos de pedidos;
- Repetir.

Teniendo en cuenta el Cuadro 3.4, el algoritmo explora todas las posibles combinaciones que representen las cantidades de pedidos a realizar en un tamaño específico del sistema. El algoritmo calcula el costo total para cada una de las alternativas posibles, realizando varios experimentos; en la siguiente sección, se procede al desarrollo de un modelo matemático. Se comienza con un ejemplo que describe el comportamiento de cada combinación cuando los requerimientos en cada periodo son constantes.

### **3.4. Modelo para un Sistema Homogéneo**

En un sistema homogéneo, cada periodo de producción o de operación se satisface con la misma cantidad de requerimientos de materiales, lo que significa que la cantidad de materiales necesarios para producir un tipo de producto o para llevar a cabo una operación es constante

en cada periodo. Esto se debe a que en este tipo de sistema, los procesos de producción o de operación son estables y no cambian significativamente de un periodo a otro, lo que permite que la cantidad de materiales necesarios para cada periodo sea constante. Además, se considera que la representación de los requerimientos de materiales en función de cada periodo permite planificar y controlar con mayor precisión la cantidad de materiales necesarios para la producción o la operación en cada periodo. En este apartado se desarrolla un modelo matemático que ayuda a optimizar la gestión de inventarios y la programación de la producción. Es así, que los requerimientos se representan en función de cada periodo como se puede apreciar en el Cuadro 3.8.

Periodo ( $i$ )	1	2	3	4	5	...	$N - 1$	$N$
Requerimientos ( $\alpha_i$ )	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	...	$\alpha_{N-1}$	$\alpha_N$

Cuadro 3.8: Cantidades necesarias de suministros  $\alpha_i$  en cada periodo para un sistema de tamaño  $N$ .

La cantidad de materiales necesarios para cada periodo de producción o de operación debe ser mayor o igual a cero. Por lo tanto,  $\alpha_i$  debe ser  $\geq 0$ . Además,  $\alpha_i = \text{constante} = \alpha$ .

Para comenzar con la explicación del modelo matemático para sistemas homogéneos, se tomó el mismo ejemplo que la sección anterior. Entonces, para una mejor comprensión del desarrollo de este modelo, es importante tener en cuenta el Cuadro 3.6 que describe cada una de las posibles combinaciones cuando el horizonte de planificación es  $N = 5$ .

Por otra parte, se deben tener presentes las variables previamente descriptas. Por consiguiente,  $a_{jk}$  es la cantidad de periodos acumulados en cada pedido de la combinación  $j$ ; también, se puede nombrar a  $a_{jk}$  como el tamaño de cada agrupamiento de la combinación  $j$ . Por otra parte  $k$  es el número de orden en cada combinación  $j$  y  $Np_j$  se define como la cantidad de pedidos totales de una combinación  $j$ . A partir de entonces, el análisis se enfoca en tres combinaciones de las dieciséis alternativas a partir de la expresión  $2^{N-1}$  (véase Cuadro 3.9), partiendo

$j \setminus i$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$Np_j$
$j_1$	$\underbrace{1}_{a_{1,1}}$	$\underbrace{1}_{a_{1,2}}$	$\underbrace{1}_{a_{1,3}}$	$\underbrace{1}_{a_{1,4}}$	$\underbrace{1}_{a_{1,5}}$	$Np_1 = 5$
$\vdots$						
$j_{12}$	$\underbrace{2}_{a_{12,1}}$	$0$	$\underbrace{3}_{a_{12,2}}$	$0$	$0$	$Np_{12} = 2$
$\vdots$						
$j_{16}$	$\underbrace{5}_{a_{16,1}}$	$0$	$0$	$0$	$0$	$Np_{16} = 1$

Cuadro 3.9: Cantidad de periodos acumulados en cada pedido. Descripción de tres de dieciséis ( $2^{N-1}$ ) posibilidades de realizar los pedidos en un tamaño de horizonte  $N = 5$ .

del ejemplo previamente detallado. En el Cuadro 3.9 se puede ver que en la combinación  $j_1$  en cada uno de los periodos  $i$  se realizan un pedido que satisface dicho periodo, entonces el valor de cada agrupamientos resultante es  $a_1=a_2=a_3=a_4=a_5=1$ , por lo que, la cantidad total de los agrupamientos es  $Np_j=5$ . Luego, en  $j_{16}$  se lleva a cabo un sólo pedido para abastecer los periodos  $i$  (1,2,3,4,5), entonces el valor del agrupamiento  $a_{16,1}=5$  y la cantidad de los agrupamientos es  $Np_j=1$ , ya que se realiza un pedido. En la combinación  $j_{12}$  se efectúa un pedido en el periodo  $i=1$  para suministrar los periodos  $i$ (1 y 2), luego se realiza un segundo pedido en el tercer periodo para satisfacer los periodos  $i$ (3,4,5). Por ende el valor de los agrupamiento es  $a_{12,1}=2$  y  $a_{12,2}=3$ , en este caso la cantidad de agrupamientos es  $Np_j=2$ . Consecuentemente, a partir de este análisis se puede llegar a la siguiente expresión:

$$\sum_{k=1}^{Np_j} a_{jk} = N = \text{Tamaño del sistema.} \tag{3.7}$$

Al mismo tiempo, luego de haber definido los siguientes parámetros como, el tamaño de

cada agrupamiento  $a_{jk}$ , las necesidades de materiales  $\alpha_i = \text{constante} = \alpha$  para cada periodo  $i$  en un horizonte de planificación  $N$  y la cantidad de agrupamientos  $Np_j$ , surge la inquietud de si es posible relacionar estas variables en una expresión matemática que permita calcular el costo total de cada combinación. Se puede asimilar, que una solución óptima es una combinación de  $a_{jk}$  que tiene un costo total mínimo. La cantidad de pedidos están entre  $1 \leq Np_j \leq N$ . Se supone que el sistema sólo tiene dos costos generales. Estos costos son el costo de preparación del pedido  $C_p$  y el costo de mantenimiento de material  $C_m$ . Resulta que, el costo total es:

$$CT = C_p Np_j + C_m \alpha \sum_{k=1}^{Np_j} a_{jk} \quad (3.8)$$

Posteriormente, a partir de aquí, las siguientes expresiones se caracterizan por la explicación de las combinaciones  $j_{16}$  y  $j_{12}$  descritas en el Cuadro 3.9.

- Combinación  $j_{16}$ :

Se lleva a cabo una sola orden de pedido en el periodo  $i_1$  para abastecer todos los periodos; donde el valor del agrupamiento es  $a_{jk} = a_{16,1} = 5$ ;  $Np_j = Np_{16} = 1$ . En este caso, el costo total de mantener las cantidades  $\alpha$  en el inventario durante los periodos  $N - 1$  es:

$$C_m = C_m \alpha (a_{16,1} - 1) + C_m \alpha (a_{16,1} - 2) + C_m \alpha (a_{16,1} - 3) + C_m \alpha (a_{16,1} - 4). \quad (3.9)$$

- Combinación  $j_{12}$ :

Aquí, existen dos pedidos: en el primer pedido, el tamaño del agrupamiento es  $a_{jk} = a_{12,1} = 2$ , por lo que el material se almacena en solo periodo  $i = 1$  y el el costo de almacenar el material

resulta:

$$C_m = C_m \alpha (a_{12,1} - 1).$$

En el segundo pedido, el tamaño del agrupamiento es  $a_{jk} = a_{12,2} = 3$ , se puede observar en el ejemplo que las necesidades se almacenan en dos periodos, es decir los periodos  $i(3, 4)$  esto se traduce como:

$$C_m = C_m \alpha (a_{12,2} - 1) + C_m \alpha (a_{12,2} - 2),$$

Si se agrupan los dos términos que se expresaron en forma algebraica anteriormente, cuando se almacenan los materiales, en cada uno de los pedidos que se realizan en la combinación  $j_{12}$ , conduce a la siguiente expresión:

$$CT_m = C_m \alpha \left[ a_{12,2}(a_{12,2} - 1) - \frac{a_{12,2}(a_{12,2} - 1)}{2} \right].$$

$$CT_m = C_m \alpha \left[ \frac{a_{12,2}(a_{12,2} - 1)}{2} \right]. \quad (3.10)$$

Finalmente, el costo total del material que se almacena es:

$$CT_m = C_m \alpha \left[ \frac{a_{jk}(a_{jk} - 1)}{2} \right]. \quad (3.11)$$

Hasta aquí, se ha analizado el costo de almacenamiento de materiales para cada una de las

combinaciones posible de realizar los pedidos. A partir de ahora, el estudio se enfoca en el costo realizar los pedidos. El costo total del realizar el requerimiento de material  $CT_p$  para todas las órdenes en cada una de las combinaciones es:

$$CT_p = C_p N p_j. \quad (3.12)$$

En definitiva, la expresión del modelo matemático que describe el costo total es:

$$CT = C_p N p_j + C_m \alpha \sum_{k=1}^{N p_j} \frac{a_{jk}(a_{jk} - 1)}{2}. \quad (3.13)$$

En resumen, el objetivo de este trabajo es obtener la combinación óptima para adquirir materiales en un sistema de tamaño  $N$ , con el menor costo posible. Para lograr esto, se utiliza la expresión matemática Ec. 3.13. Este modelo no solo encuentra la solución óptima, sino que también calcula el costo total de cada alternativa resultante. Además, puede ser el punto de partida para un análisis más detallado del comportamiento de los tamaños de agrupamiento. En la siguiente sección, se lleva a cabo este análisis de manera detallada.

### 3.4.1. Comportamiento de los tamaños de agrupamientos

En esta Tesis, uno de los temas centrales consiste en investigar el comportamiento de los tamaños de los agrupamientos que aparecen en la matriz. Cabe recordar que en dicha matriz se encuentran todas las combinaciones posibles cuando se realizan los pedidos. Hasta el momento, se ha logrado encontrar el modelo matemático que determina el costo total de cada alternativa posible al momento de solicitar el material cuando los requerimientos son constantes.

En este apartado, se exploran posibles escenarios que demuestren la capacidad del modelo y la complejidad del sistema analizado y su representación. Para cada uno de estos escena-

rios, se utiliza el término *costo total de almacenamiento* de la Ec. 3.13, con el objetivo de mantener la generalidad de los resultados; se propone a un nuevo término  $CT^*$  y se denomina *costo total reducido*. Es importante destacar que la inclusión de los costos de preparación del pedido solo agrega una constante a la ecuación, lo que permite un análisis específico del comportamiento de los agrupamientos para varios horizontes de planificación o tamaños  $N$  del sistema. Por otro lado, el costo de mantener inventario aumenta dependiendo de la cantidad de material almacenado.

### Política de abastecimiento con dos pedidos

Se comienza con el análisis cuando se realizan dos pedidos en un determinado tamaño de sistema. Los requerimientos de materiales se satisfacen en dos órdenes de pedidos,  $Np_j = 2$ . Siguiendo el ejemplo del Cuadro 3.9, para el caso de combinación  $j_{12}$ , se expresa:

$$CT^* = a_{12,1}(a_{12,1} - 1) + a_{12,2}(a_{12,2} - 1).$$

Teniendo en cuenta que  $a_{12,1} + a_{12,2} = N$ , luego  $a_{12,2} = N - a_{12,1}$ , se obtiene:

$$CT^* = a_{12,1}(a_{12,1} - 1) + \{(N - a_{12,1})[(N - a_{12,1}) - 1]\},$$

aplicando propiedad distributiva, se desprende:

$$CT^* = a_{12,1}^2 - a_{12,1} + N^2 - Na_{12,1} - Na_{12,1} + a_{12,1}^2 - N + a_{12,1},$$

agrupando los términos correspondiente y realizado operaciones algebraicas se concluye:

$$CT^* = 2a_{12,1}[-(-a_{12,1} + N)] + N^2 - N.$$

Donde  $a_{12,2} = N - a_{12,1}$  y sustituyendo, resulta:

$$CT^* = -2a_{12,1}a_{12,2} + N^2 - N.$$

$$CT^* = -2a_{12,1}(N - a_{12,1}) + N(N - 1).$$

Consecuentemente,

$$CT^* = N(N - 1) - 2a_{jk}(N - a_{jk}). \quad (3.14)$$

$$CT = C_p N p_j + C_m \alpha (N(N - 1) - 2a_{jk}(N - a_{jk})). \quad (3.15)$$

Como se puede ver, el costo total de dos pedidos  $N_{pj} = 2$ , resultó en función del horizonte de planificación  $N$  y función de un solo valor de agrupamiento  $a_{jk}$ .

Considerando la ecuación Ec.3.14, y mediante una interpretación gráfica, se examina un ejemplo específico en el que  $N = 10$ . Se analiza el comportamiento de este sistema únicamente para los pedidos que se agrupan  $1 < a_{jk} < N$ , y la cantidad de pedidos sean  $N_{pj} = 2$ .

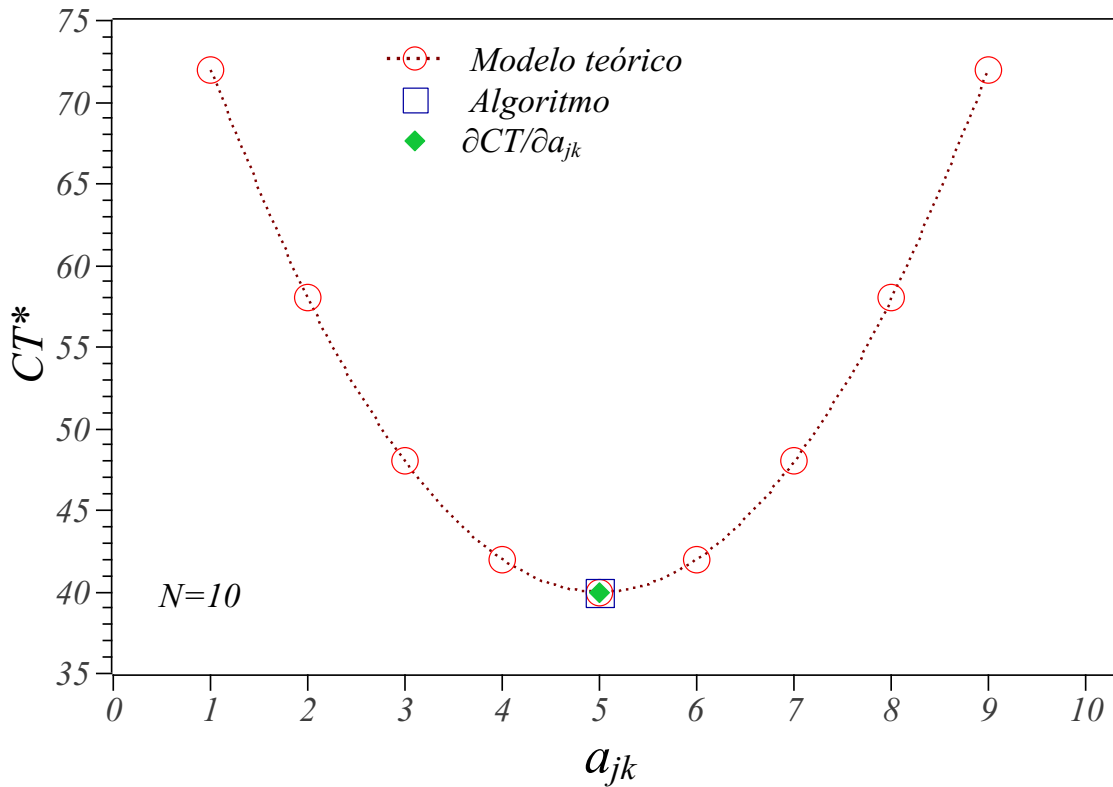


Figura 3.2: Relación entre el costo total reducido y el tamaño de dos agrupamientos ( $a_{jk}$ ) para un tamaño del sistema  $N=10$ . La línea continua se comporta sólo como una guía.

En la Figura 3.2. Se puede observar que en el eje abscisas se encuentran los valores de agrupamiento de cada pedido, mientras que en el eje de las ordenadas se representa el costo total reducido  $CT^*$ , para dos pedidos en un sistema con  $N = 10$  periodos. Los puntos circulares de color rojo representan los siguientes escenarios: el punto en la esquina superior izquierda, donde el primer agrupamiento  $a_{j1} = 1$ , muestra la situación en la que el primer agrupamiento abarca solamente un periodo. Por lo tanto, se determina que el segundo agrupamiento cubre los nueve periodos restantes ( $a_{j2} = N - a_{j1} = 9$ ). El punto en la esquina superior derecha donde primer agrupamiento cubre nueve periodos  $a_{j1} = 9$  y el segundo agrupamiento está implícitamente determinado para cubrir el periodo restante ( $a_{j2} = N - a_{j1} = 1$ ). Un hallazgo interesante

es que en estas dos situaciones, los costos totales reducidos son los más altos. Por otra parte, el mismo valor del costo total reducido se obtiene cuando se cambia el valor de  $a_{j1}$  por el valor de  $a_{j2}$ . Es importante tener en cuenta que el subíndice  $j$  puede representar cualquier combinación posible de los elementos en un sistema de tamaño  $N = 10$ , siempre y cuando tenga solo dos agrupamientos, es decir  $Np_j = 2$ . Se puede apreciar que cuando los tamaños de los agrupamientos de  $a_{jk}$  tienden a parecerse, en cuanto a su tamaño, el costo total reducido es mínimo.

En resumen, el costo total mínimo se alcanza cuando los valores de agrupamiento son iguales  $a_{j1} = a_{j2} = 5$ , lo que implica que ambos agrupamientos tienen un tamaño de  $N/2$ , tal como se puede observar en la Figura 3.2. Un punto muy importante es poder verificar los resultados obtenidos. Entonces, el primer paso es reescribir la Ec. 3.14, por lo que el costo total es una función cuadrática:

$$CT^* = 2a_{jk}^2 - 2a_{jk}N + N(N - 1). \quad (3.16)$$

A partir de la Ec. 3.16, partiendo de la variación del costo total al variar el tamaño de los pedidos a realizar en el periodo determinado  $\partial CT / \partial a_{ji}$  se obtiene:

$$f'(a_{jk}) = -2N + 4a_{jk}. \quad (3.17)$$

En la Ec.3.17, teniendo presente que  $N = 10$  existe un mínimo igual a 5. Por lo tanto, si aplicamos el criterio de la derivada primera obtenemos mismo valor del mínimo que la Ec.3.14, donde describe el comportamiento de los agrupamientos, cuando  $Np_j = 2$ . Esto confirma que el valor del costo mínimo es igual al valor obtenido cuando los agrupamientos son del mismo tamaño.

Del mismo modo, se realizó el análisis para distintos tamaños de sistemas  $N$ . La Figura

3.3 muestra el costo total para valores de  $N$  ( $N \leq 21$ ). También, muestra un sistema de dos agrupamientos ( $Np_j = 2$ ).

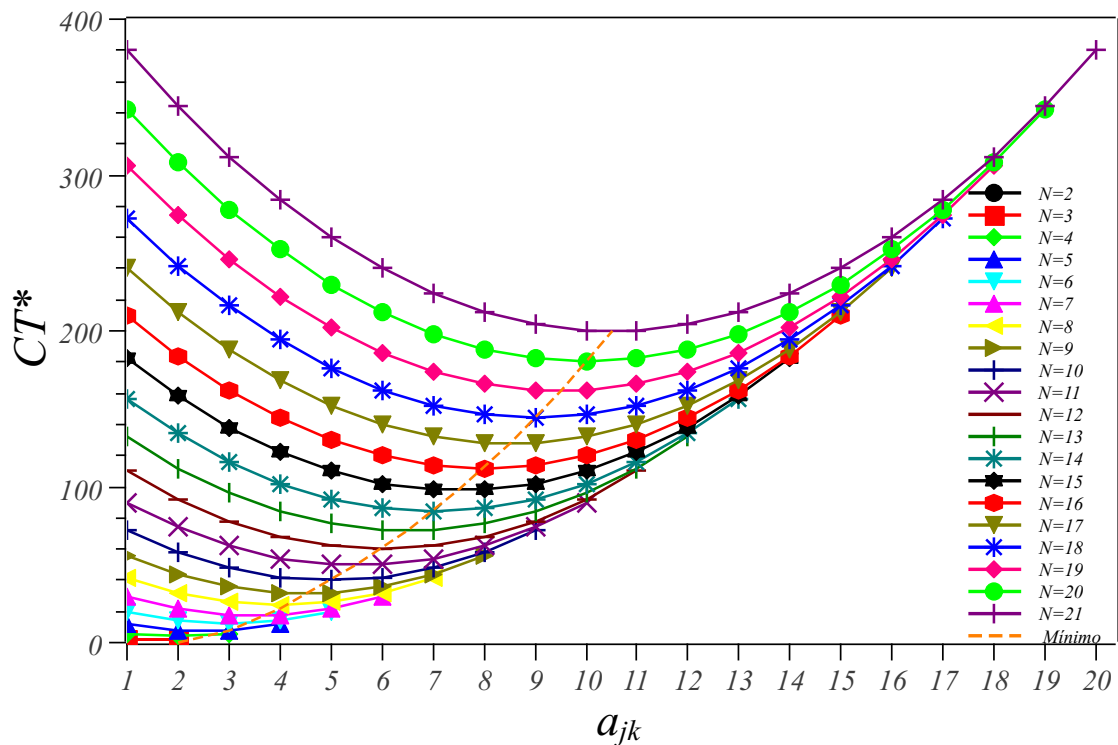


Figura 3.3: Relación entre el costo total reducido y el tamaño de dos agrupamientos distintos ( $a_{jk}$ ), en horizontes de planificación  $N$ . La línea continua se comporta sólo como una guía.

Se observa nuevamente, que el costo mínimo se obtiene cuando  $a_{jk} = N/2$  para todos los casos. Los resultados obtenidos simplifican el proceso de determinación del tamaño de lote óptimo, siempre y cuando se cumplan los supuestos establecidos en el estudio.

En esta sección, se ha identificado una característica particular en el comportamiento de los agrupamientos de igual tamaño, en este caso  $Np_j = 2$ ; que ha permitido encontrar la solución óptima. Sin embargo, se necesita explorar agrupamientos de tamaños mayores a dos para diferentes tamaños de sistemas. De esta manera, se podría confirmar o no, si este tipo de

comportamientos ocurre siempre que los tamaños sean iguales.

### Política de abastecimiento con tres pedidos

Siguiendo el mismo criterio del análisis para dos agrupamiento, se procede al estudio para tres agrupamientos en las combinaciones que se pueden presentar en un horizonte de planificación. Entonces, si se considera que los requerimientos de material se satisfacen en tres órdenes,  $Np_j = 3$  y la ecuación obtenida es:

$$CT^* = N(N - 1) - 2a_{jk1}(N - a_{jk1}) - 2a_{jk2}(N - a_{jk2}) + 2a_{jk1}a_{jk2}, \quad (3.18)$$

$$CT = C_p Np_j + C_m \alpha (N(N - 1) - 2a_{jk1}(N - a_{jk1}) - 2a_{jk2}(N - a_{jk2}) + 2a_{jk1}a_{jk2}). \quad (3.19)$$

El costo total obtenido es para cuando los agrupamientos resultantes en un combinación son  $Np_j = 3$  y se encuentran función de  $N$  y de dos valores de agrupamientos  $a_{jk1}$ ,  $a_{jk2}$ . A modo representativo, se observa en la Figura 3.4 que muestra el costo total mínimo para un sistema de tamaño  $N = 21$ .

En este caso, se ha utilizado únicamente tres agrupamientos, ( $Np_j = 3$ ), considerando todas las combinaciones posibles entre ellos. La Figura 3.4 es interesante porque muestra que el costo total mínimo se obtiene cuando los tres agrupamientos tienen el mismo tamaño, es decir, cuando,  $a_{j1} = a_{j2} = a_{j3} = N/3 = 21/3 = 7$ . La Figura 3.5 muestra la vista superior de la Figura 3.4, en la que se representan los costos totales en función de  $a_{j1}$  y  $a_{j2}$ . En la Figura 3.6 se aprecia la región factible para la resolución del problema cuando los agrupamientos son tres y de tamaños iguales. La esquina inferior izquierda representa el caso en el que los valores

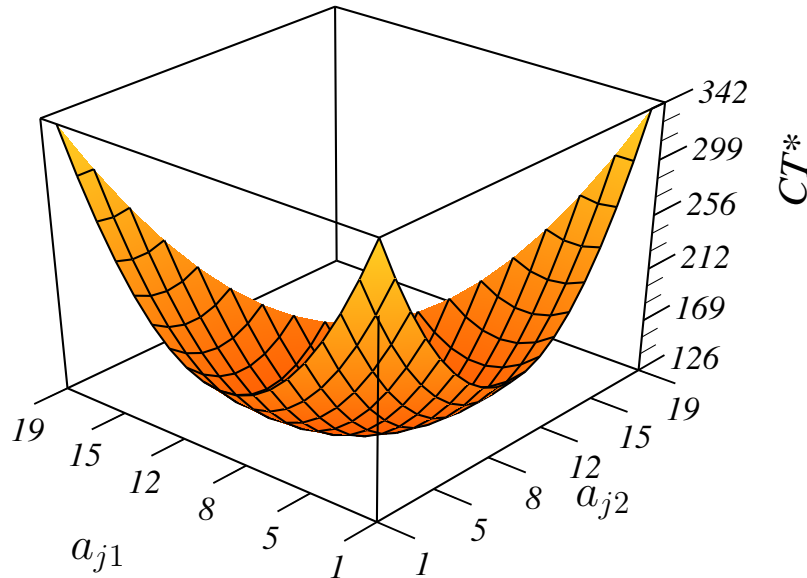


Figura 3.4: Relación entre el costo total reducido y el tamaño de tres agrupamientos ( $a_{jk}$ ) para un sistema de tamaño  $N = 21$ .

de los tamaños de los pedidos  $a_{j1}$  y  $a_{j2}$  tienen un valor de 1, por lo que el tamaño de pedido  $a_{j3} = 19$ . Este caso extremo, en el que los tamaños de los agrupamientos son significativamente diferentes, hace que los costos totales sean máximos. Los resultados obtenidos son los mismo del análisis anterior, si se estudia para la esquina superior izquierda y la esquina inferior derecha. Sin embargo, se observa que los costos totales son mínimos cuando los valores de los tamaños de pedidos son 7, lo cual coincide con el desarrollo seguido hasta el momento. En definitiva, la solución que arroja menor costo total corresponde a los valores de  $a_{jk} = N/3 = 7$ . Este valor está representado por un cuadrado oscuro en la región factible, Figura 3.5 (b). Además, esta región también admite soluciones debajo de la diagonal, ya que en el sistema no es posible obtener valores mayores a la misma. Es posible identificar regiones de igual costo, representadas por los valores de costo total de 130, 151, 201.

En este apartado, los resultados obtenidos se detallan en los siguientes puntos:

I) Los costos máximos se observan en el extremos, cuando uno de los tres agrupamientos es  $a_{jk1} = N - a_{jk2} - a_{jk3}$ , y en consecuencia, los otros dos tamaños de pedidos son  $a_{jk2} = a_{jk3} = 1$ .

II) En la Figura 3.4, se puede observar que el costo total mínimo se encuentra en el valor  $a_{jk} = N/3$ ,

III) Comparando la Figura 3.3 y la Figura 3.4, el comportamiento analizado se repite independientemente de la cantidad de periodo.

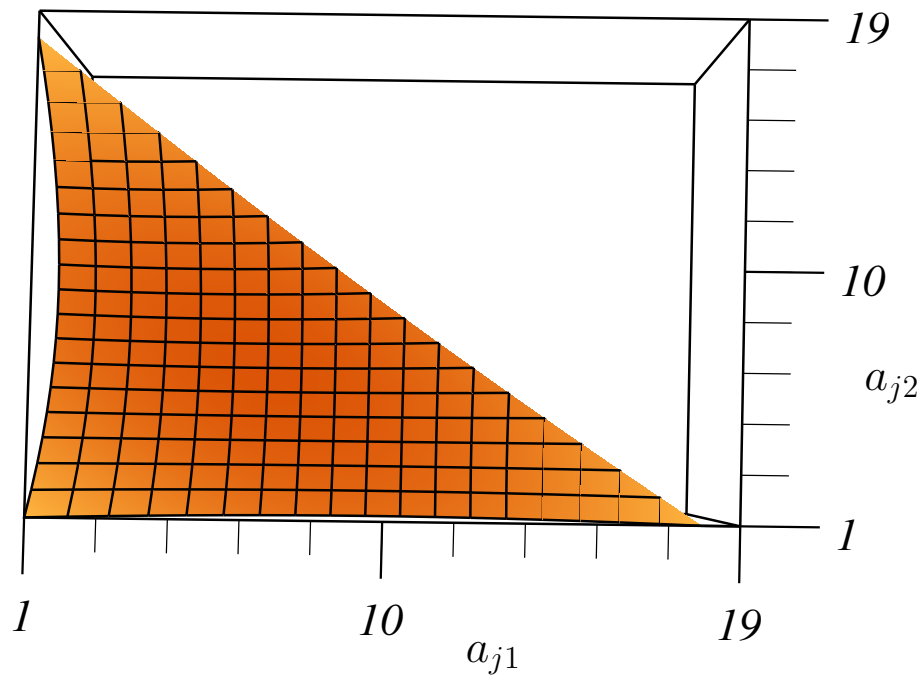


Figura 3.5: Vista superior que muestra los costos totales en función de los tamaños de agrupamientos  $a_{j1}$  y  $a_{j2}$ .

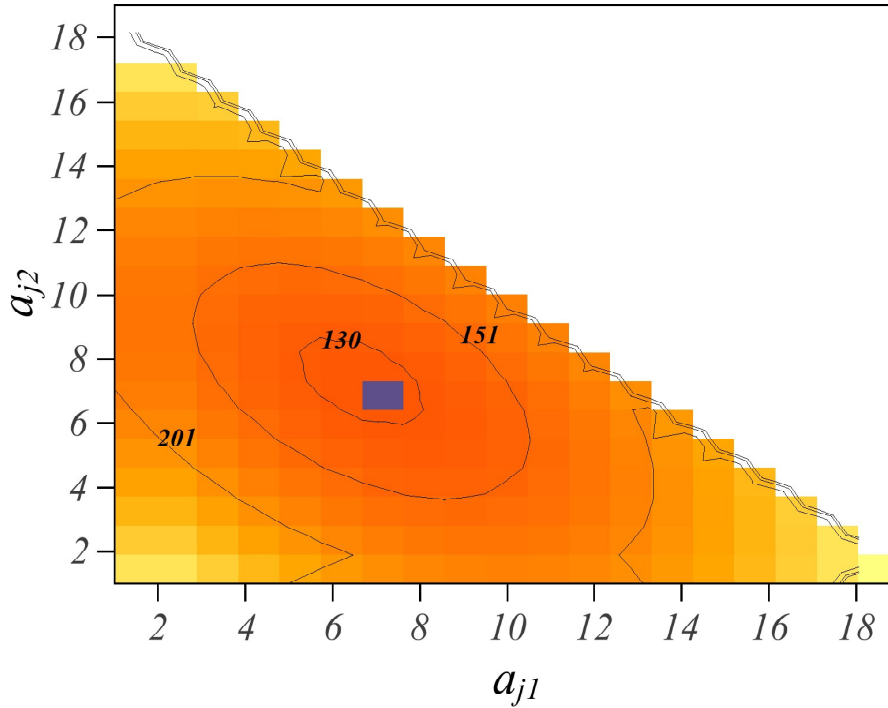


Figura 3.6: Espacio de soluciones factibles para los mismos valores de agrupamientos en el eje de las abscisas, donde el mínimo de la función del costo total está en  $a_{jk} = 7$ .

**Política de suministro con más de tres pedidos**

En esta sección se llevó a cabo un análisis similar al realizado anteriormente cuando los agrupamientos eran en dos y tres tamaños. Cabe destacar que el análisis en una representación gráfica sería complejo. Es por ello, que se desarrolló la siguiente expresión matemática.

$$\begin{aligned}
 CT = & C_p N p_j + C_m \alpha (N(N - 1) - 2a_{jk1}(N - a_{jk1}) - 2a_{jk2}(N - a_{jk2}) - \dots \\
 & - 2a_{jk(Np_j-1)}(N - a_{jk(Np_j-1)})) + 2 \sum_{i=1}^{Np_j-1} \sum_{l=i+1}^{Np_j-1} a_{jki} a_{jkl}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

El costo total de cada una de las combinaciones cuando los agrupamientos que contemplan a los periodos acumulados son mayores a tres  $Np_j > 3$  dependen de  $N$  y  $(Np_j - 1)$  y se encuentra en función de los agrupamientos  $a_{jk}$ . Se puede ver en la expresión matemática obtenida que representa un sistema de tamaño  $N$  y es afectado por los tamaño de los agrupamientos. Se concluye, que estos tamaños de agrupamientos son la variable independiente y permite relacionar que el costo mínimo total se obtiene cuando los tamaños de los agrupamientos son iguales.

Se puede ver un ejemplo donde el tamaño del sistema es  $N = 240$ , se quiere obtener el tamaño de los agrupamientos para que la solución incluya sólo 6 tamaños de pedidos . Aplicando la Ec. 3.20 y utilizando el programa online Wolfram Alpha, se resuelve el sistema:

$$\begin{aligned} &Min[(a_1 - 1)a_{j1} + (a_{j2} - 1)a_{j2} + (a_{j3} - 1)a_{j3} + (a_{j4} - 1)a_{j4} + (a_{j5} - 1)a_{j5} \\ &+ (240 - a_{j1} - a_{j2} - a_{j3} - a_{j4} - a_{j5} - 1)(240 - a_{j1} - a_{j2} - a_{j3} - a_{j4} - a_{j5})] \end{aligned}$$

Donde los valores mínimos obtenidos para los seis pedidos considerados son:

$$a_{j1} = a_{j2} = a_{j3} = a_{j4} = a_{j5} = a_{j6} = 40.$$

Se concluye, con mayor certeza que la solución del sistema homogéneo es un conjunto de agrupamientos de igual tamaño. Este resultado puede generalizarse para cualquier  $N$ , siempre que  $N$  sea múltiplo de  $Np_j$ . Sin embargo, cuando  $Np_j$  no es múltiplo de  $N$  el comportamiento del sistema será diferente al primero, véase el Apéndice C.

**Resultados obtenidos para un Sistema Homogéneo cuando los tamaños de los agrupamientos son iguales**

En esta sección, se muestran resultados obtenidos, a partir de ejemplos numéricos para mostrar cómo un gerente de compras puede utilizar el enfoque propuesto.

Para un tamaño de sistema  $N = 12$ , hay  $2^{N-1} = 2048$  posibilidades de ordenar materiales para satisfacer las necesidades del horizonte de planificación. En este trabajo utilizamos un horizonte de planificación máximo de  $N=20$ . Esto hace que la cantidad de combinaciones posibles representadas en una matriz, se pueda realizar el análisis correspondiente en un tiempo productivo. Esto produce limitación en nuestro análisis, sin embargo se toma como un desafío en investigaciones a futuras donde se analizarán horizontes de planificación mayores. Entonces, dependiendo de la cantidad de pedidos a realizar, que es el valor de  $Np_j$ , con la metodología propuesta se puede notar que la cantidad de opciones con costos mínimos se reducen notablemente. Estas opciones se muestran en el Cuadro 3.10, esta matriz ha sido obtenida a partir de un programa informático de desarrollo propio. Por tanto, este estudio simplifica la determinación de las cantidades a pedir en función del tamaño de las agrupaciones de pedidos, ya que de 2048 combinaciones se redujo a 12 alternativas posibles cuando se realizan los pedidos del material; es decir entre las 12 combinaciones se encuentra la opción óptima. La evaluación del modelo arrojó resultados satisfactorio, porque establece un aporte importante a la hora de tomar una decisión bajo ciertas consideraciones generales.

$j \setminus i$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$i_6$	$i_7$	$i_8$	$i_9$	$i_{10}$	$i_{11}$	$i_{12}$	$Np_j$
$j_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$Np_1 = 12$
$j_2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	$Np_2 = 11$
⋮													
$j_6$	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	2	0	$Np_6 = 10$
⋮													
$j_{22}$	1	1	1	1	1	1	2	0	2	0	2	0	$Np_{22} = 9$
⋮													
$j_{86}$	1	1	1	1	2	0	2	0	2	0	2	0	$Np_{86} = 8$
⋮													
$j_{342}$	1	1	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	$Np_{342} = 7$
⋮													
$j_{1366}$	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	$Np_{1366} = 6$
⋮													
$j_{1372}$	2	0	2	0	2	0	3	0	0	3	0	0	$Np_{1372} = 5$
⋮													
$j_{1756}$	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	$Np_{1756} = 4$
⋮													
$j_{1912}$	4	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	$Np_{1912} = 3$
⋮													
$j_{2016}$	6	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	$Np_{2016} = 2$
⋮													
$j_{2048}$	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Np_{2048} = 1$

Cuadro 3.10: Doce posibilidades de las dos mil cuarenta y ocho ( $2^{N-1}$ ) alternativas de pedir material para un sistema de tamaño  $N = 12$ .

### 3.5. Análisis estadístico para un Sistema Heterogéneo

Esta sección se centra en el sistema heterogéneo definido en el Capítulo 2, es importante recordar que en este tipo de sistema, la cantidad de materiales necesarios para producir un tipo de producto o llevar a cabo una operación varía en cada periodo.

Es relevante resaltar que en este estudio se enfoca en analizar el comportamiento de los agrupamientos resultantes de cada combinación posible al realizar los pedidos. Para ello, se

utiliza el algoritmo propuesto en la sección 3.3. Es necesario aclarar que este algoritmo opera en la matriz descrita en la sección 3.2.3. Además, cabe señalar su importancia en el funcionamiento del algoritmo. A continuación se detallan los diferentes procedimientos que lleva a cabo para el estudio de los agrupamientos de pedidos en un sistema heterogéneo:

- Se realizan simulaciones numéricas utilizando el algoritmo para diferentes tamaños de sistemas  $N$  y requerimientos variables. A partir de estas simulaciones, se determinan las combinaciones óptimas para cada horizonte de planificación.
- Se identifican de los tamaños de agrupamientos más frecuentes que aparecen en las combinaciones óptimas obtenidas.

Dado que el tema de interés en esta sección es el estudio del comportamiento de los agrupamientos en sistemas heterogéneos, es importante destacar que los procedimientos descritos anteriormente serán fundamentales para comprobar si existe algún patrón que relacione, el cociente entre el costo de pedir y el costo de almacenamiento del material con la frecuencia relativa de los agrupamientos, que contienen los tamaños resultantes de las combinaciones óptimas obtenidas. De esta manera, se elabora un modelo de gráfico de densidad (o diagrama de caja discreto), capaz de representar la frecuencia acumulada de los tamaños óptimos de los pedidos más repetidos.

Para comenzar, se debe tener en cuenta que en este estudio particular la demanda de cada periodo es una distribución aleatoria uniforme. Se presentan a continuación los diversos supuestos que se consideran en el análisis:

- Se asignan distintas cantidades a la variable  $\alpha_i$ . Cuyos valores deben estar comprendidos entre  $0 \leq \overline{\alpha}_i \leq \alpha_{imax}$ , y tienen una distribución uniforme entre dichos valores mínimo

y máximo. El valor máximo alcanzado de los requerimientos en cada experimento es  $\alpha_i = 40$  y el valor promedio es  $\bar{\alpha}_i = 20$ .

- La suma de todas las cantidades  $\alpha_i$  es un valor constante para cada tamaño de sistema  $N$ ; 
$$\sum \alpha_i = \bar{\alpha}_i N.$$
- Para establecer los valores y llevar a cabo la simulación, se consideran costos de preparación del pedido de  $C_p = 25, 100, 200$  y  $300$ .
- El costo de almacenamiento del material es  $C_m = 1$ .

Estos supuestos se toman en cuenta para distintos tamaños  $N$  del sistema y diferentes cantidades de órdenes de compra en cada periodo. Se llevan a cabo  $10^6$  experimentos numéricos para cada tamaño  $N$  del sistema y para cada relación de costos  $C_p/C_m$ . Estos experimentos se realizan para tamaños de sistemas  $1 \leq N \leq 20$ .

A través de un estudio estadístico, es posible observar la frecuencia relativa con la que aparecen los diferentes agrupamientos para cada estrategia óptima utilizada en cada experimento. Esta información puede ser utilizada para relacionar las frecuencias de aparición de los distintos agrupamientos con los costos óptimos. Al analizar la relación entre la frecuencia relativa de un agrupamiento y el costo óptimo, es posible obtener información valiosa sobre los patrones y tendencias que subyacen en la información resultante de cada experimento. La Figura 3.7 muestra la frecuencia relativa y la función de densidad de probabilidad del tamaño del agrupamiento para una relación entre el costo de preparación del pedido,  $C_p = 25$  y el costo de almacenamiento  $C_m = 1$ , ( $C_p/C_m = 25$ ) y el tamaño del sistema es  $N = 10$ .

Se puede observar que los tamaños de los agrupamientos  $a_{jk}$  siguen una distribución normal característica. Resulta llamativo que los tamaños más frecuentes son  $a_{jk} = 2$ , seguidos de

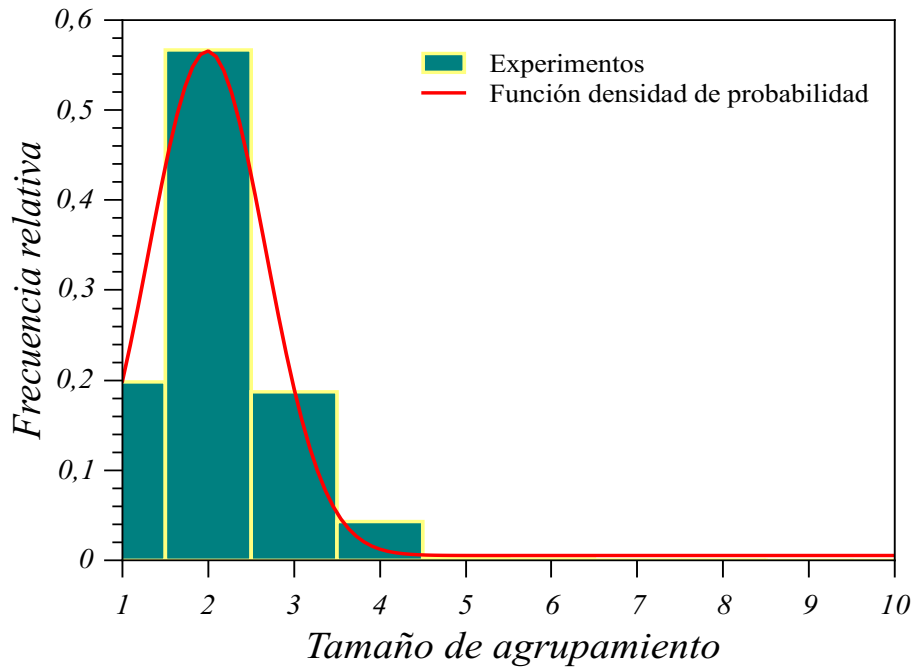


Figura 3.7: Función de frecuencia relativa de los tamaños de los agrupamientos  $a_{jk}$  de las soluciones óptimas para un sistema de tamaño  $N = 10$  y  $C_p/C_m = 25$ , el valor más probable de  $a_{jk}$  es  $\sim 2$ . Se observa una curva sobreimpresa, que describe distribución de densidad de probabilidad de esa serie de datos.

$a_{jk} = 1, 3, 4$ . También es relevante destacar que los agrupamiento con tamaños  $a_{jk} > 4$  no suelen aparecer en las soluciones óptimas.

Se puede hacer un estudio similar para sistemas de tamaños  $N = 2, 3, 4, \dots, 19, 20$  con la misma relación de los costos. El propósito de este estudio es determinar el tamaño de agrupamiento más probable  $a_{jk}$  a medida que aumenta el tamaño  $N$  del sistema.

La Figura 3.8 representa las distribuciones de densidad de probabilidad para todos estos tamaños de sistema. Es muy evidente que esta distribución de frecuencias relativas de agrupamiento se repite para todos los  $N$ . Esto da un patrón del comportamiento de este sistema, en el que a medida que crece el tamaño  $N$  del sistema, el tamaño más probable  $a_{jk}$  de agrupación que

aparece en la solución óptima es  $a_{jk} \sim 2$ . Como puede observarse, los valores medios y las desviaciones típicas de todas las medidas son cualitativamente similares. Entonces, es válido hacer una conjetura de que para esta relación de costos es conveniente realizar pedidos pequeños y descartar los pedidos grandes independientemente del tamaño del sistema.

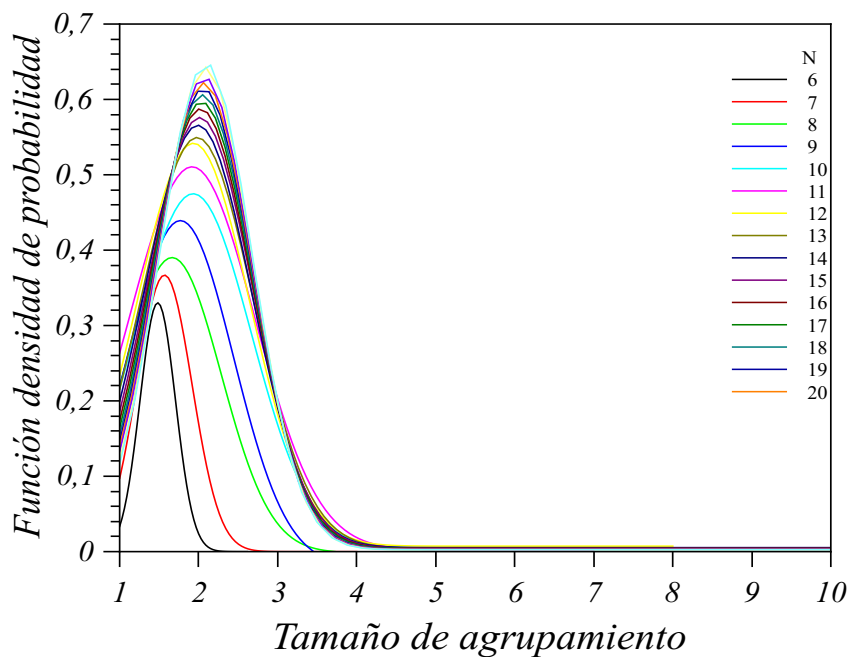


Figura 3.8: Función densidad de probabilidad para los tamaños de sistemas  $2 \leq N \leq 20$ , en función de los tamaños de agrupamientos ( $a_{jk}$ ). Se observa que, independientemente del tamaño del sistema, el valor más probable de  $a_{jk}$  es  $\sim 2$  cuando la relación de costos es  $C_p/C_m = 25$ .

Del mismo modo, se analiza el caso cuando la relación de los costos es  $C_p/C_m = 100$  para el tamaño de sistema  $N = 10$ , Figura 3.9. Se puede observar en este caso que el tamaño de agrupamientos más frecuente es de  $a_{jk} = 3$ , seguido de tamaños de agrupamientos cercanos a este valor. Los tamaños de pedidos  $a_{jk} > 6$  prácticamente no se han seleccionado dentro de las opciones que dan un costo óptimo.

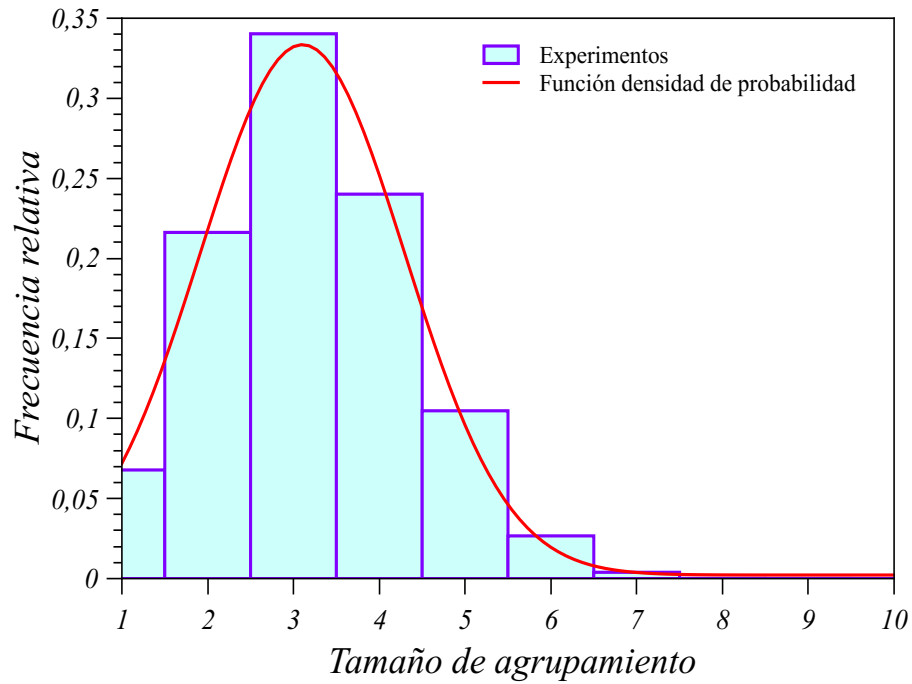


Figura 3.9: Distribución de frecuencia de los tamaños de agrupamientos  $a_{jk}$  de las soluciones óptimas para un sistema de tamaño  $N = 10$  y  $C_p/C_m = 100$ . Se observa una curva sobreimpresa que describe la función de densidad de probabilidad de la serie de datos.

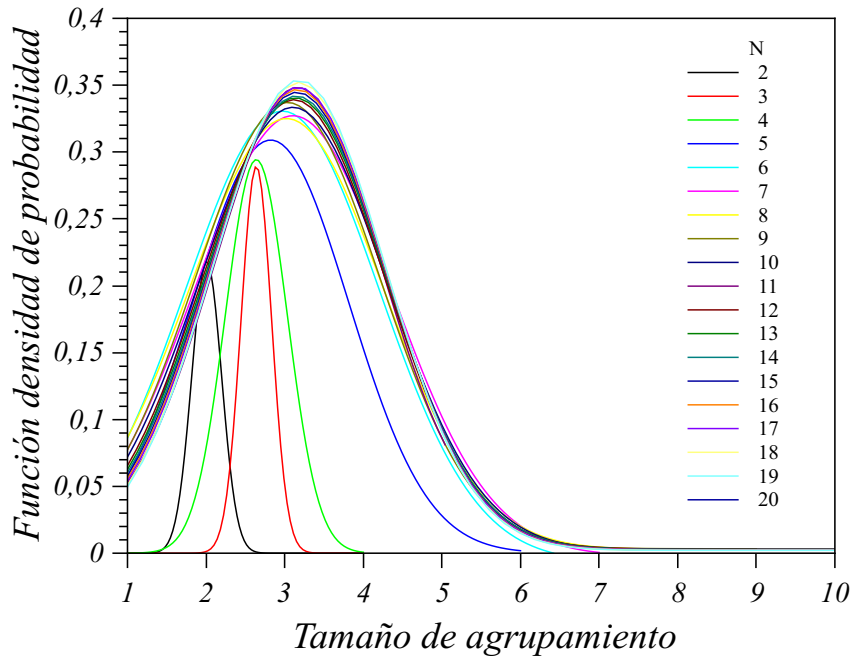


Figura 3.10: Funciones de densidad de probabilidad de los tamaños  $2 \leq N \leq 20$  y  $C_p/C_m = 100$ ; en función de los tamaños de agrupamientos  $a_{jk}$ .

Ahora, se procede a analizar los datos correspondientes a la relación de costos  $C_p/C_m = 100$ , considerando tamaños del sistema  $2 \leq N \leq 20$ . Estas distribuciones de frecuencia se presentan conjuntamente en la Figura 3.10 para facilitar su comparación. Puede observarse que para un sistema de tamaño  $N \geq 6$  los extremos máximos indican que el agrupamiento de pedidos probablemente esté centrado en  $a_{jk} \sim 3$ . Esto sugiere, que es preferible realizar pedidos considerando tamaños similares (grupo centrado en  $a_{jk} \sim 3$ ). En resumen, la Figura 3.10 muestra claramente como se comporta el sistema para tamaños pequeños,  $2 \leq N \leq 6$ . A medida que aumenta el tamaño del sistema, por ejemplo  $N = 3, 4, 5$ ; la distribución desplaza sus puntos máximos a  $a_{jk} \sim 3$  ya que las soluciones óptimas implican tamaños de pedidos  $a_{jk} = 3$ . Entonces se puede ver, que cuando el tamaño del sistema es mayor a  $N = 6$ ,

todas las distribuciones prácticamente se superponen. Esto sugiere que, independientemente del tamaño del sistema, las soluciones óptimas son una combinación de tamaños de pedido que se encuentran en el rango  $1 \leq a_{jk} \leq 6$ . Por lo tanto, se puede descartar el análisis de combinaciones que incluyan tamaños de pedido superiores a  $a_{jk} > 6$ , lo que a su vez reduce el tiempo de cómputo necesario para encontrar la solución óptima.

Considerando las dos relaciones de costos previamente mencionadas,  $C_p/C_m = 25$  y  $C_p/C_m = 100$ , se procede a realizar una comparación entre ambas situaciones. De esta manera, se busca interpretar los resultados obtenidos respecto al estudio de los tamaños de agrupamientos. Cuando la relación es  $C_p/C_m = 25$ , se observa lo que sucede en la Figura 3.11 izquierda, allí se detecta claramente que los tamaños óptimos se concentran en  $a_{jk} = 1, 2, 3, 4$ . Se establece que los pedidos deben tener tamaños entre 1 y 4, significa que cada pedido abarca un máximo de 4 periodos y no se permite pedidos que abarquen más de ese número de periodos. En otras palabras, los pedidos se dividirán en pequeñas unidades de tiempo para asegurar una mejor eficiencia en la producción. Sin embargo, en el caso de la Figura 3.11 derecha, donde el cociente es  $C_p/C_m = 100$ , se observa que al incrementar el costo de preparación del pedido hace que los tamaños óptimos tiendan a desplazarse hacia pedidos más grandes. Esto significa, que los tamaños de agrupamientos óptimos se concentran en tamaños mayores. Definitivamente, se concluye que los tamaño óptimo resultante de pedidos se encuentran en  $a_{jk} \sim 2$  para  $C_p/C_m = 25$  y  $a_{jk} \sim 3$  para  $C_p/C_m = 100$  como se muestra en las figuras 3.8 y 3.10 respectivamente.

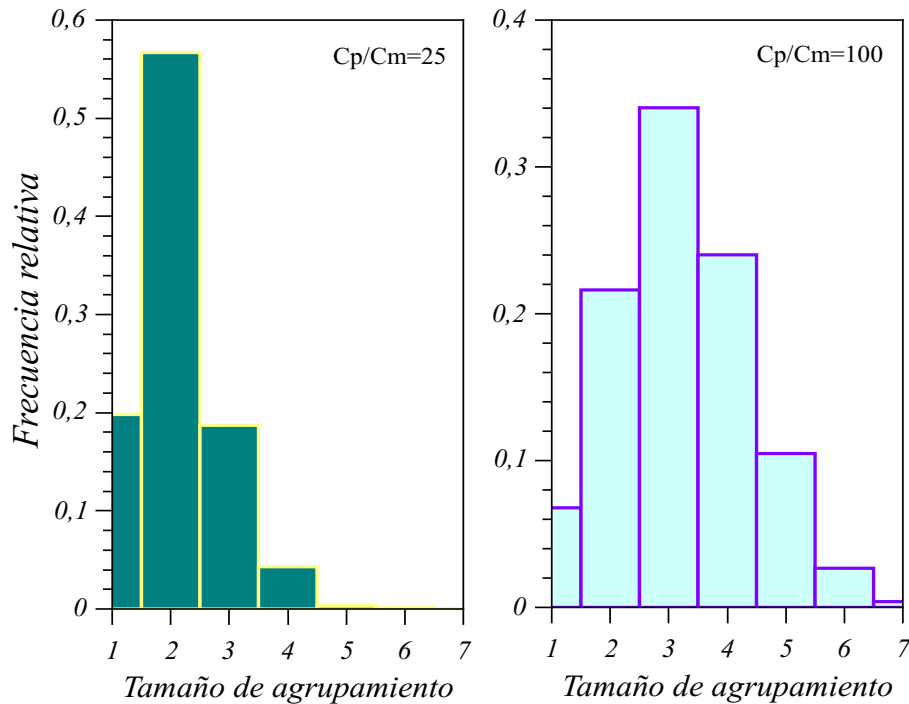


Figura 3.11: Comparación de la frecuencia relativa para  $C_p/C_m = 25$  y  $C_p/C_m = 100$  para el mismo tamaño de sistema en función de los tamaños de agrupamientos  $a_{jk}$ . Se observa el cambio en el tamaño óptimo del pedido en función de la relación  $C_p/C_m$ .

Ahora se analiza el caso cuando el cociente de los costos es  $C_p/C_m = 200$  y el tamaño del sistema es  $N = 10$ . Para ello se tiene en cuenta el análisis gráfico mostrado en la Figura 3.12. Se puede concluir que los tamaños de agrupamientos,  $a_{jk}$ , se distribuyen nuevamente de forma característica siguiendo una distribución normal. El valor principal de tamaños de agrupamiento se centra en  $a_{jk} \sim 5$ .

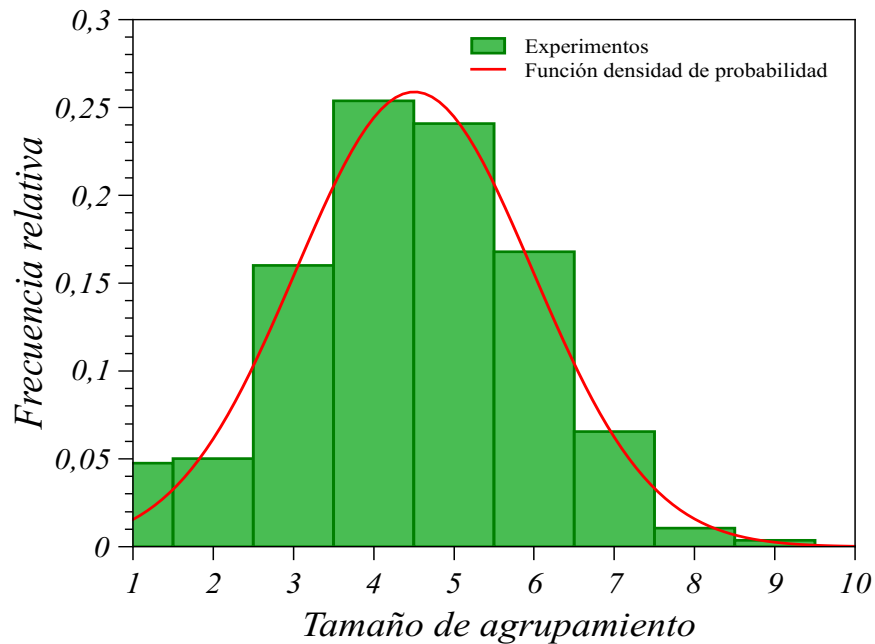


Figura 3.12: Frecuencia relativa para los diferentes tamaños de agrupamientos óptimos  $a_{jk}$ , para un sistema de tamaño  $N = 10$  y  $C_p/C_m = 200$ .

Siguiendo el mismo procedimiento, se analizaron los tamaños de sistema restantes ( $2 \leq N \leq 20$ ), Figura 3.13. Se observa que los valores medios y las desviaciones típicas de todas las mediciones son cualitativamente similares.

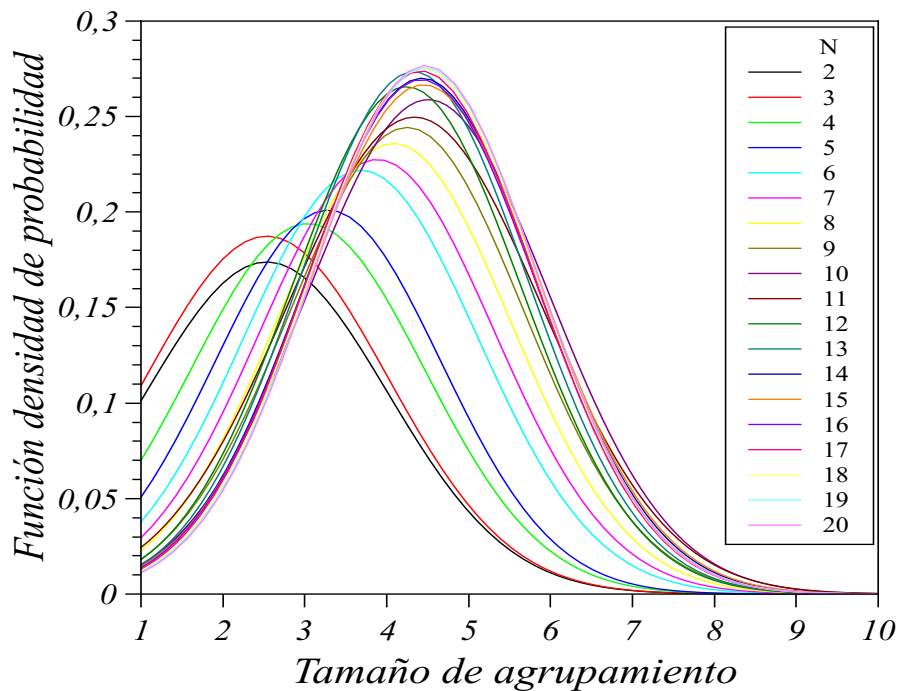


Figura 3.13: Función de densidad de probabilidad para los tamaños  $2 \leq N \leq 20$  y  $C_p/C_m = 200$ .

Es posible que al realizar un nuevo estudio comparativo de las frecuencias relativas de las relaciones de costos  $C_p/C_m = 25, 100$  y  $200$  y para un tamaño de sistema  $N = 7$ , se pueden encontrar consecuencias significativas en los resultados. En la representación gráfica, Figura 3.14, se puede apreciar este fenómeno; del mismo modo, se puede ver que hay un desplazamiento significativo hacia la derecha del tamaño de pedido óptimo basado en la relación  $C_p/C_m$ . Esto quiere decir, que a medida que aumenta la relación de costos, es probable que los tamaños de pedidos óptimos aumenten y se produzca un desplazamiento hacia la derecha en la distribución de los tamaños de pedidos. Esto se debe a que cociente de los costos es proporcional al desplazamiento hacia la derecha en la distribución, lo que significa que a medida que la relación de costos aumenta, los agrupamientos que contienen las soluciones óptimas tienden a ser

más grandes en tamaño. Por lo tanto, es importante considerar la relación de costos al tomar decisiones sobre el tamaño de los pedidos y la cantidad de inventario que se debe mantener en una empresa.

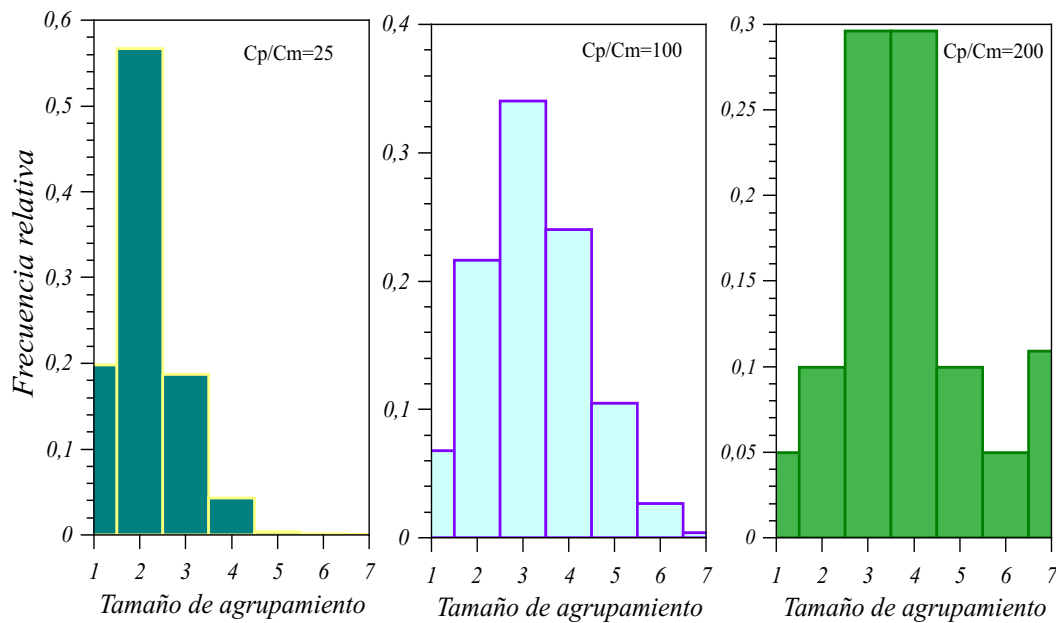


Figura 3.14: Comparación de la frecuencia relativa para  $C_p/C_m = 25, 100$  y  $200$ , para tamaños  $1 \leq a_{jk} \leq 7, N = 7$ . Se observa el cambio en el tamaño óptimo del pedido en función de la relación  $C_p/C_m$ .

Para finalizar la etapa de experimentación, se analiza la función de probabilidad de los tamaños de agrupamientos para una relación entre los costos;  $C_p/C_m = 300$  para  $N = 10$ . La Figura 3.15 muestra que los tamaños pedidos  $a_{jk}$ , se distribuyen de forma similar siguiendo una distribución normal. Se puede ver en la gráfica que el tamaño de agrupamiento que predomina, teniendo en cuenta que satisfacen las soluciones óptimas, es  $a_{jk} \sim 6$  para tamaños de sistema  $N > 10$ . Se observa que los valores medios y las desviaciones típicas de todas las mediciones son cualitativamente similares como se ha visto en todos los casos anteriores; sin embargo, para

los tamaños de sistema pequeños los valores medios de las distribuciones son inferiores a 6.

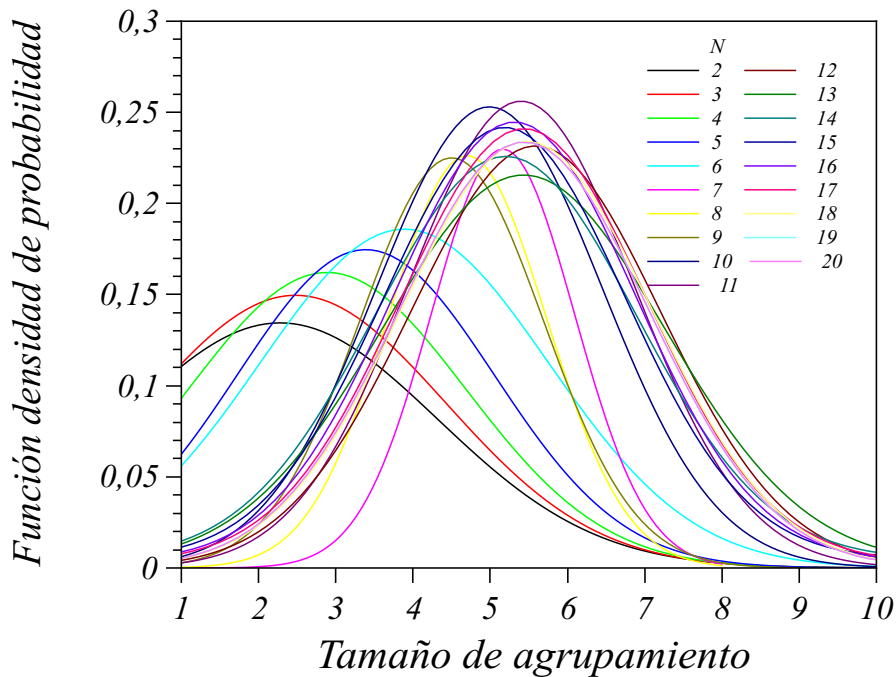


Figura 3.15: Distribuciones de la función de densidad de probabilidad para los tamaños  $2 \leq N \leq 20$  y  $C_p/C_m = 300$ .

Por último, se analiza en forma gráfica (véase Figura 3.16 ) un estudio de comparación entre los tamaños óptimos para un sistema  $N = 7$ , para las relaciones de costos  $C_p/C_m = 25, 100, 200, 300$ . Se aprecia un comportamiento similar a los casos anteriores, se puede ver, la existencia de extremos máximos. Por un lado, uno de los extremos se centra entre  $\sim 3$  y  $4$  y por otro lado, el otro extremo máximo se centra en  $\sim 7$ .

A continuación, se analiza el caso para una relación de costos  $C_p/C_m = 300$  y se compara con los estudios de los casos anteriores; para este caso conviene hacer un único pedido de materiales, donde el tamaño sea  $a_{jk} = 7$ . Entonces se concluye que las opciones de pedidos que abarcan pocos periodos y opciones de pedidos que abarcan muchos periodos son poco

probables. A medida que aumenta el valor de  $N$  la distribución de densidad de probabilidad se centra en un valor de  $a_{jk} \sim 6$ .

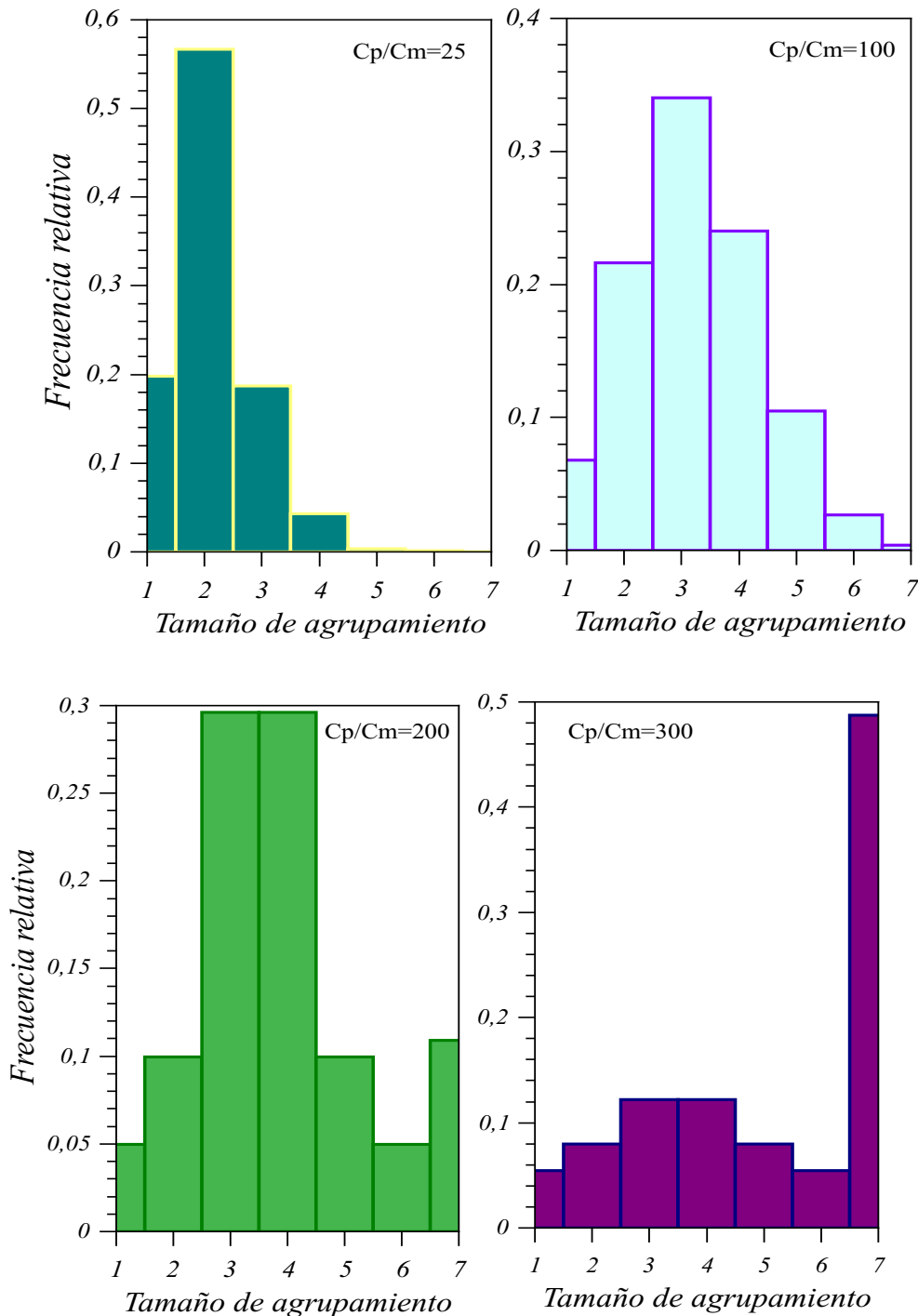


Figura 3.16: Comparación de la frecuencia relativa para  $C_p/C_m = 30, 100, 200,$  y  $300$ , para tamaños  $1 \leq a_{jk} \leq 6$ . Se observa el cambio en el tamaño óptimo del pedido en función de la relación  $C_p/C_m$ .

Finalmente, la tendencia de seleccionar tamaños de pedido óptimos más grandes se refuerza a medida que aumenta la relación de costos. Esto se debe a que la relación de costos  $C_p/C_m$  influye en la decisión de los tamaños de pedido óptimos y, como resultado, cuando la relación de costos aumenta, la preferencia por tamaños de pedido óptimos más grandes se hace más fuerte (véase Figura 3.17 ). Esta tendencia se explica por el hecho de que a medida que la relación de costos  $C_p/C_m$  aumenta, los costos de almacenamiento por unidad disminuyen, lo que hace que sea más rentable comprar mayores cantidades de productos a la vez. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la relación de costos al determinar los tamaños de pedido óptimos para garantizar que la empresa esté optimizando sus costos y maximizando su rentabilidad. En cuanto al tamaño del sistema, los estudios sugieren que una vez que el tamaño del sistema supera cierto umbral ( $N > 12$ ), la política de adquisición se estabiliza en un valor medio mucho menor que el tamaño del sistema. Esto significa que, en general, el tamaño del sistema no afecta la determinación de los tamaños de los agrupamientos óptimos (véase Figura 3.18); sin embargo, como se nombró anteriormente, un factor clave es la relación de los costos  $C_p/C_m$ , de ello dependerá de los tamaños de agrupamientos óptimos.

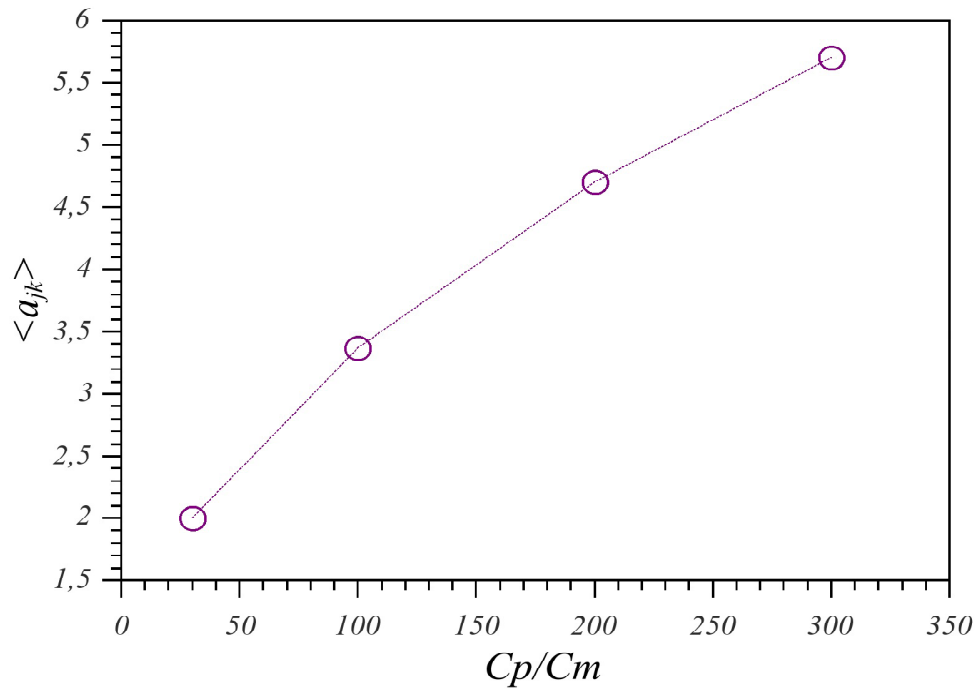


Figura 3.17: Tamaños medios de los agrupamientos  $\langle a_{jk} \rangle$  en función de la relación de costos de pedido y almacenar material  $C_p/C_m$ .

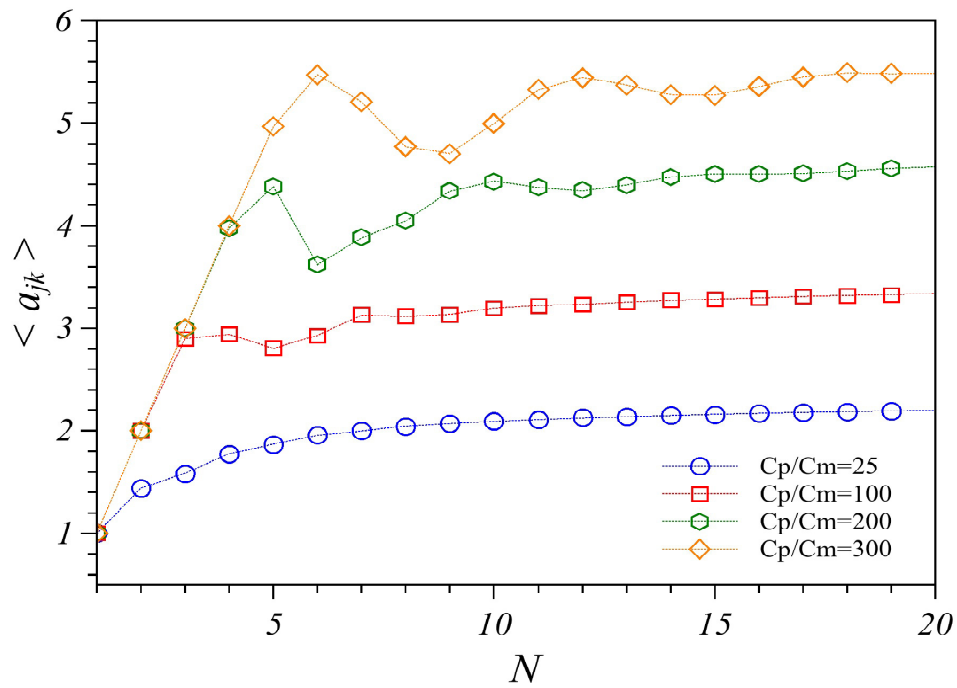


Figura 3.18: Tamaños medios de los agrupamientos  $\langle a_{jk} \rangle$  en función del tamaño del sistema  $N$  y para diferentes relaciones de costos de pedir y almacenar material  $C_p/C_m$ .

### Conclusiones Parciales

Es posible inferir un patrón característico en la forma de agrupar los órdenes que permite decidir qué caso utilizar y cuál no tener en cuenta, pudiendo así reducir el número de combinaciones a analizar. Esta situación se encuentra limitado a un rango de heterogeneidad, en cual queda pendiente desafíos a futuro como el análisis de reducción de los requerimientos de materiales utilizados en este análisis.

### **3.5.1. Análisis comparativo de Modelo propuesto vs Metodología de Inteligencia Artificial (Clustering – K-Means)**

En el Capítulo 2, se destacó que las tecnologías digitales es un tipo de metodología en constante evolución. Con el objetivo de explorar perspectivas futuras, se lleva a cabo un análisis comparativo entre el algoritmo propuesto para el análisis de un sistema heterogéneo y el método de Clustering – K-Means. Como se expuso en el Marco Teórico Referencial, este enfoque se basa en un método de aprendizaje no supervisado, lo que implica que solo se dispone de datos de entrada sin estar asociados a una salida deseada. En este estudio, los datos de entrada serán los tamaños promedio de pedidos con los costos totales involucrados para un determinado horizonte de planificación, donde el software utilizado es Python. A continuación se ilustran las siguientes figuras teniendo presente que el  $C_p/C_m = 100$  y el horizonte de planificación es  $N = 8$ .

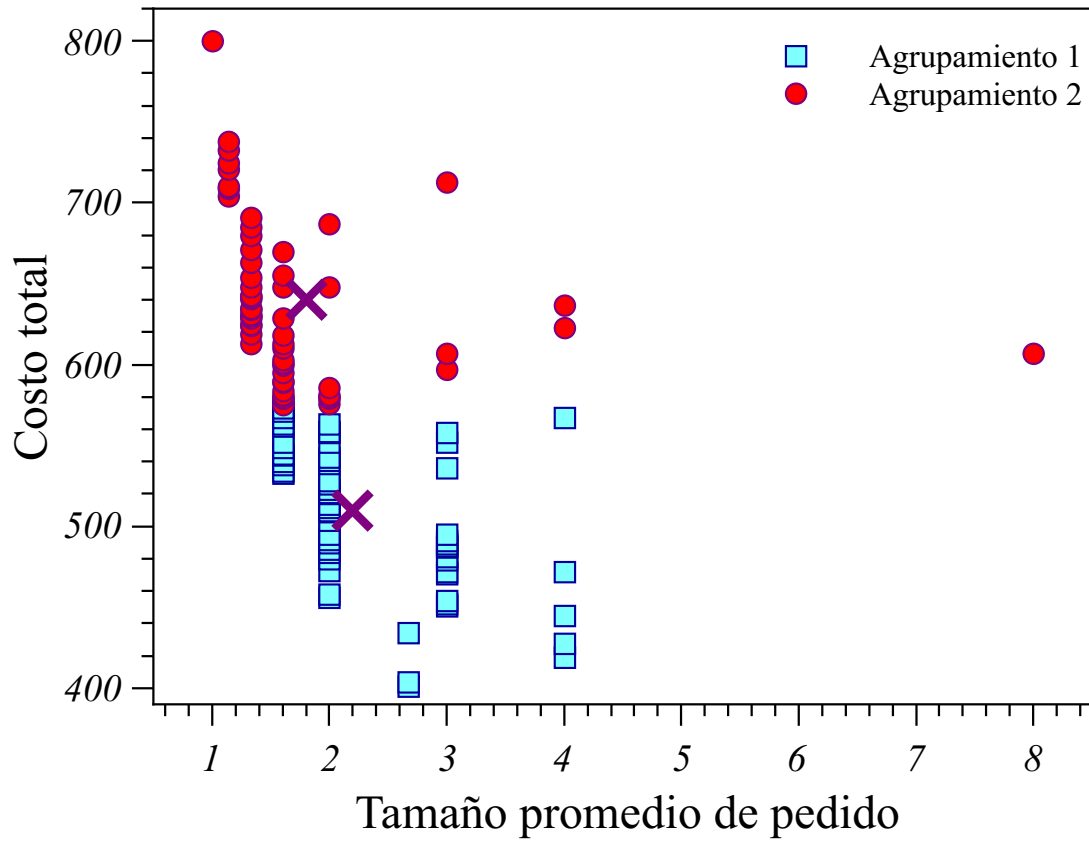


Figura 3.19: Costo total en función del tamaño promedio de pedido. Dos cluster de los tamaños promedios de pedidos.

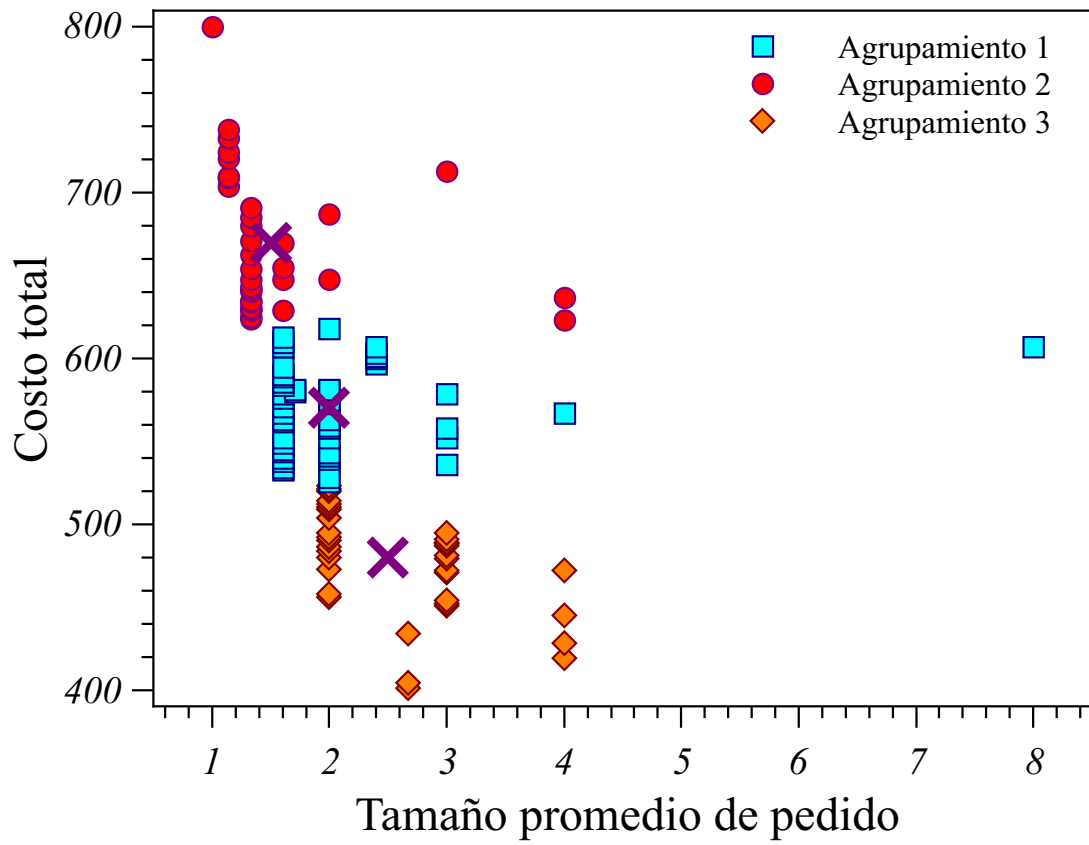


Figura 3.20: Costo total en función del tamaño promedio de pedido. Tres cluster de los tamaños promedios de pedidos.

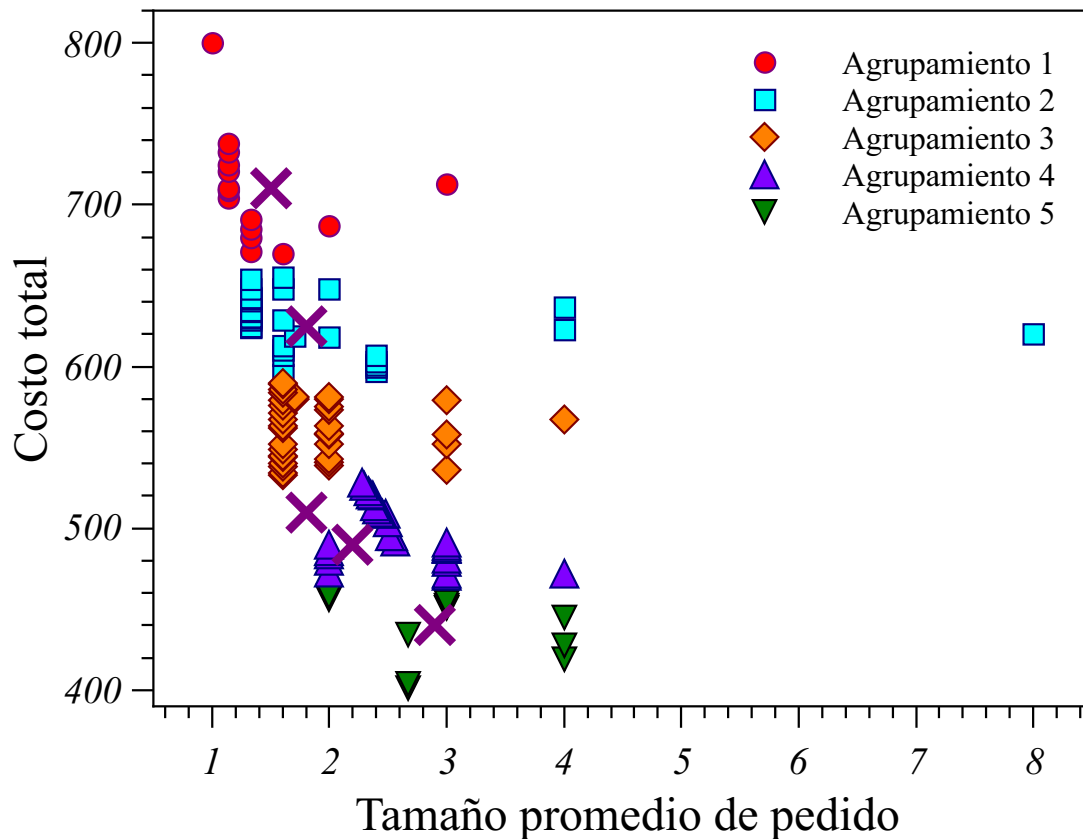


Figura 3.21: Costo total en función del tamaño promedio de pedido. Cinco cluster de los tamaños promedios de pedidos.

En la Figura 3.19 y Figura 3.20, se puede observar que para el estudio de dos y tres agrupamientos, el cluster que representa los tamaños promedios de pedidos con menores costos se concentra principalmente en los tamaños de pedidos dos y tres. Mientras que, en la Figura 3.21, es evidente que el agrupamiento que determina los menores costos está asociado al tamaño de pedido tres. Si se observa la Figura 3.10, se puede apreciar que los resultados obtenidos son similares en ambos métodos y en conclusión se establece la oportunidad de futuras investigaciones de obtener un modelo analítico bajo esta metodología para un sistemas heterogéneo.

### 3.5.2. Conclusiones parciales del análisis de Metodología y Resultados

Según los resultados obtenidos para cuando los requerimientos de material se mantienen constantes en cada periodo, se puede afirmar:

*i)* Se obtuvo una expresión analítica que representa las características fundamentales para un sistema de tamaño  $N$  donde se establece una relación funcional entre el tamaño de pedido y el tamaño del sistema. Una ecuación de estas características es de vital importancia en el análisis de las estructuras fundamentales de los sistemas suministrados.

*ii)* Generalizando, para sistemas de tamaño  $N$  y cantidades constantes de adquisición de material, las soluciones óptimas son agrupamientos de igual tamaño  $N/N_{pj}$ . Esta generalización permite simplificar el análisis y tomar decisiones en escenarios donde las cantidades de materia prima necesarias en un proceso productivo son constantes durante un determinado número de periodos.

*iii)* Los costos máximos son combinaciones de clústeres con tamaños extremadamente diferentes. Cuando la relación entre el tamaño del pedido es grande, hay una indicación de que los costos totales no serán mínimos.

*iv)* El uso de este modelo teórico en un caso de estudio real reduce los costos totales acumulados. Realizar pedidos de igual tamaño produce beneficios económicos para las empresas.

Por otra parte, en base a lo analizado para un sistema heterogéneo, se puede afirmar:

*i)* para una relación dada existe entre los costos de preparación del pedido y los costos de almacenamiento, un tamaño de agrupamiento medio más probable que sigue una ley de distribución normal característica;

*ii)* la distribución normal del tamaño medio del agrupamiento es similar en sus características a todos los  $N$ ;

*iii)* para un sistema dado se puede concentrar en obtener la solución óptima, si se consideran

únicamente los tamaños de agrupamientos más frecuentes;

*iv)* Cuando la relación  $C_p/C_m$  es alta y los  $N$  tamaños son pequeños, la política de compra óptima es el tamaño máximo del sistema. Por otro lado, cuando la relación  $C_p/C_m$  es baja y los tamaños de  $N$  son pequeños, la política de compra óptima son los tamaños del agrupamiento  $a_{jk} \sim 1$ . Finalmente, si la relación  $C_p/C_m$  es alta y los tamaños de  $N$  son grandes, la política de compra óptima se estabiliza en un valor dado de  $a_{jk}$ .

## **Capítulo IV**

### **Validación del Modelo Propuesto**

La validación del modelo es el proceso de cuantificar la concordancia entre la predicción del modelo y los datos experimentales para garantizar que el modelo de predicción pueda representar bien el sistema físico real.

## 4.1. Sistema Elásticos de Resortes

En la naturaleza, existen varios sistemas que exhiben propiedades elásticas y comparten características similares entre sí. Para este tipo de experimento, se tiene en cuenta el comportamiento de un sistema elástico de resorte. De esta manera validar el modelo propuesto es decir, comparar las predicciones del modelo con los datos observados en los apartados anteriores. Finalmente se tiene en cuenta que el sistema elástico de los resortes se encuentra en equilibrio, por lo tanto la sumatoria de las fuerza es igual a 0. Entonces, si el sistema está en equilibrio, los resortes no se deforman y mantienen su tamaño en la solución resultante. Antes de comenzar a describir el desarrollo de este experimento, es necesario presentar las siguientes analogías de las variables del Modelo propuesto sobre las políticas de abastecimiento:

- El tamaño del sistema  $N$ , se reemplaza por la variable  $M$ .
- El valor de los agrupamientos (periodos acumulados) formados en cada combinación obtenida  $a_{jk}$ , se reemplaza por  $n_i$ .
- El valor  $Np_j$ , se determina como  $N$ .

### 4.1.1. Modelo con base en el comportamiento de un Sistema de Resortes

Suponiendo que  $\alpha$  es la materia prima necesaria para el proceso de fabricación en cada periodo. Una de las estrategias para pedir la cantidad de material podría ser, que las necesidades

de  $M$  se soliciten al inicio de cada periodo. En consecuencia el costo total del proceso de realizar los pedidos es:

$$H_0(M) = MC_p. \quad (4.1)$$

Donde  $H_0(M)$  es el costo total de realizar los pedidos para una combinación dada. Cabe recordar, que uno de los objetivos de esta Tesis es minimizar los costos al realizar los pedidos para el abastecimiento de materiales durante la producción. Además, es fundamental considerar cómo el comportamiento de los tamaños de agrupamiento influye en los costos totales.

A partir de ahora el proceso de abastecimiento de materiales y los costos asociados en un horizonte de planificación, se realiza a partir del comportamiento de un sistema de resortes (como se muestra en la Figura 4.1).

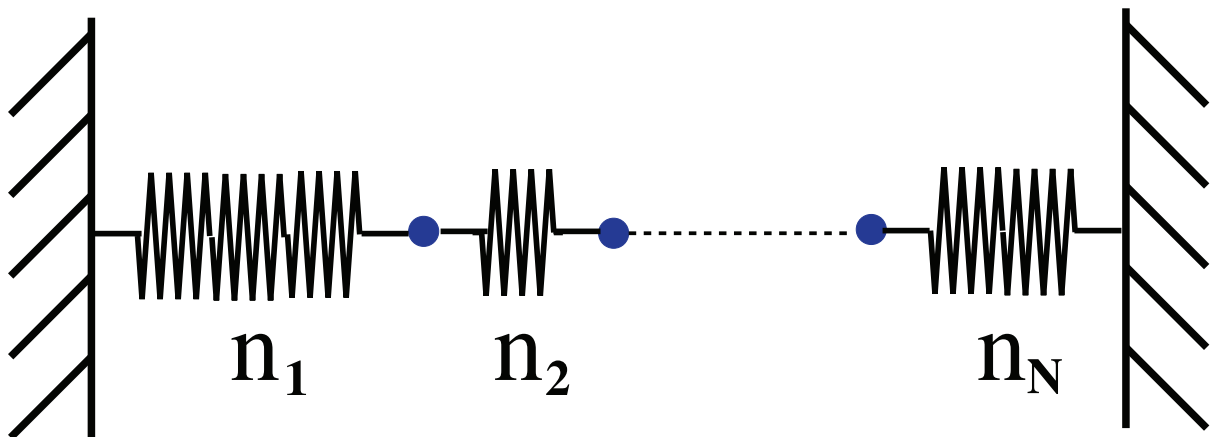


Figura 4.1: Representación esquemática de un conjunto de  $(N - 1)$  partículas (círculos sólidos) conectadas por  $N$  muelles lineales.

Los resortes podrían simular los tamaños de agrupamiento  $n_i$  que contienen una cierta cantidad de periodos, mientras que los círculos azules representarían el inicio y el final de los tamaños de los pedidos que se han generado. Entonces, cada estrategia comienza por ordenar

$n_1$  elementos. Después de  $n_1$  periodos, se agotan estos suministros y se realiza un pedido de  $n_2$ . Este proceso continúa de manera similar hasta completar los  $M$  periodos. Por lo tanto, cualquier estrategia puede ser codificada mediante un conjunto de  $N(\leq M)$  números  $n_i$  (donde  $i = 1, \dots, N$ ) que cumple con:

$$\sum_{i=1}^N n_i = M. \quad (4.2)$$

Es importante considerar que cuando se realizan los pedidos es posible que se almacene cierto material, lo que genera un costo asociado al tener ese material en el inventario. Este costo se conoce como costo de almacenamiento, como se explicó en secciones previas. Es decir, se define el costo de almacenamiento  $C_m$  como el costo de almacenamiento por periodo y unidad de materia prima, entonces la estrategia determinada por el conjunto  $n_i$  representa un costo total dado por:

$$H(\{n_i\}) = H_0(N) + V(\{n_i\}). \quad (4.3)$$

Dado que  $V(\{n_i\})$  es el costo de almacenamiento.

Donde:

$$V(\{n_i\}) = C_m \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i-1} j = \frac{C_m \alpha}{2} \sum_{i=1}^N n_i(n_i - 1). \quad (4.4)$$

Asimismo, si tenemos en cuenta la Eq. (4.2), puede reescribirse como:

$$V(\{n_i\}) = \frac{C_m \alpha}{2} \sum_{i=1}^N n_i^2 - \frac{C_m \alpha M}{2}. \quad (4.5)$$

Si se observa la Ec. 4.5, tiene una estructura similar a la energía potencial de un sistema unidimensional compuesto por  $N - 1$  partículas conectadas por  $N$  resortes lineales de constante

elástica  $C_m\alpha$ , con una longitud total de  $\sum_{i=1}^N n_i = M$ . La única diferencia es la presencia de una constante aditiva de  $-C_m\alpha M/2$  en la ecuación. La Figura 4.1 muestra un esquema de este sistema.

Al seguir esta analogía, se puede observar que para un valor dado de  $N$ , la configuración  $n_i$  que minimiza  $V(n_i) = V_0(N)$  es aquella en la que todos los resortes tienen la misma longitud. En esta configuración, la fuerza sobre cada partícula es nula, lo que significa que el sistema se encuentra en equilibrio. Por ende:

$$n_i = \frac{M}{N}, \quad \text{for } i = 1, \dots, N. \quad (4.6)$$

En la Ec. 4.6 se observa que el tamaño de los agrupamientos  $n_i$  en cada combinación está determinado por la relación entre el tamaño total del sistema  $M$  y la cantidad de pedidos  $N$ . Se puede demostrar esto mediante la siguiente estrategia: expresar la variable  $V$  en función de  $N - 1$  variables independientes  $\{n_1, \dots, n_{N-1}\}$

$$V(\{n_1, \dots, N - 1\}) = \frac{C_m\alpha}{2} \left[ \sum_{i=1}^{N-1} n_i^2 + (M - \sum_{i=1}^{N-1} n_i)^2 - M \right]. \quad (4.7)$$

Donde las condiciones mínimas resultan:

$$0 = \frac{\partial V}{\partial n_i}, \quad \text{for } i = 1, \dots, N - 1. \quad (4.8)$$

En consecuencia la Ec. 4.8 resulta equivalente a la siguiente expresión:

$$n_i = M - \sum_{j=1}^{N-1} n_j \quad \text{for } i = 1, \dots, N - 1. \quad (4.9)$$

La constante del lado derecho de la Ec. 4.9 puede determinarse sumando sobre  $i$  de 1 a

$N - 1$ , lo que conduce al resultado indicado en la Ec.4.6. Por lo tanto, para un número dado  $N$  de pedidos (o resortes), el valor mínimo de  $V$  es:

$$V_0(N) = \frac{C_m \alpha}{2} M \left( \frac{M}{N} - 1 \right). \quad (4.10)$$

Se pretende encontrar el valor de  $N$  que minimice el costo total (o energía), se considera la siguiente función:

$$H_0(N) + V_0(N) = C_p N + \frac{C_m \alpha}{2} M \left( \frac{M}{N} - 1 \right), \quad (4.11)$$

dicho valor óptimo de  $N$  para el cual la función alcanza su valor mínimo es:

$$N_{op} = \begin{cases} M & \text{if } \gamma \leq 1 \\ \gamma^{-1/2} M & \text{if } \gamma > 1 \end{cases}, \quad (4.12)$$

donde:

$$\gamma = \frac{2C_p}{C_m \alpha}. \quad (4.13)$$

Se observa que esta función por parte Ec.4.12 está definida por la variable  $\gamma$  en su dominio. También, se aprecia en la Ec.4.13 que  $\gamma$  depende del cociente entre los costos, lo que permite a la función arrojar información sobre los agrupamientos óptimos. Si  $\gamma \leq 1$ , entonces el tamaño del agrupamiento debe ser igual al tamaño del sistema, lo que implica que se debe realizar un solo pedido con  $N = 1$ . Por otro lado, si  $\gamma > 1$ , el tamaño del agrupamiento óptimo es  $\gamma^{-1/2} M$  (la explicación de este comportamiento se detalla más adelante). Así, se concluye que la mejor estrategia consiste en un número  $N_{op}$  de pedidos donde sus distancias entre ellos es idéntica; de esta manera, se logra un costo total óptimo.

$$H_{\text{op}} = C_p M f(\gamma), \quad (4.14)$$

Por lo que:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma \leq 1 \\ \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} & \text{if } \gamma > 1 \end{cases} \quad (4.15)$$

A partir de lo expuesto, se puede afirmar que cuando las cantidades requeridas en cada periodo son constantes ( $\alpha=\text{constante}$ ), las soluciones óptimas se obtienen a través de pedidos de igual tamaño ( $n_i=N_{\text{op}}/M$ ). En caso de que el cociente no resulte en un número entero, el tamaño de las agrupaciones están compuesto por una combinación de tamaños similares (según Tobares et al., 2021). Otra forma expresar el tamaño de los pedidos es:

$$n_i = \sqrt{\gamma}. \quad (4.16)$$

### Resultados y discusiones. Análisis de sensibilidad

En esta sección, se presentan algunos resultados que se derivan de las ecuaciones desarrolladas anteriormente. Estos resultados se aplican a la determinación del tamaño de lote en un sistema de producción. Suponiendo que se cuenta con un plan de trabajo cuyo horizonte de planificación tiene un tamaño de  $M$ . Es posible probar diferentes políticas de suministro de materiales, como comprar todo el material al principio del plan de trabajo, lo que implica  $N = 1$ , o adquirir los materiales en cada periodo, es decir,  $N = M$ . En este contexto, resulta fundamental determinar cuál política genera el menor costo.

**Para  $\gamma$  constante cuando para distintos horizontes de planificación**

Se analiza primero qué ocurre cuando la relación entre el costo de preparación del pedido, el costo de almacenamiento y las cantidades utilizadas en cada periodo para  $\gamma = 0$ .

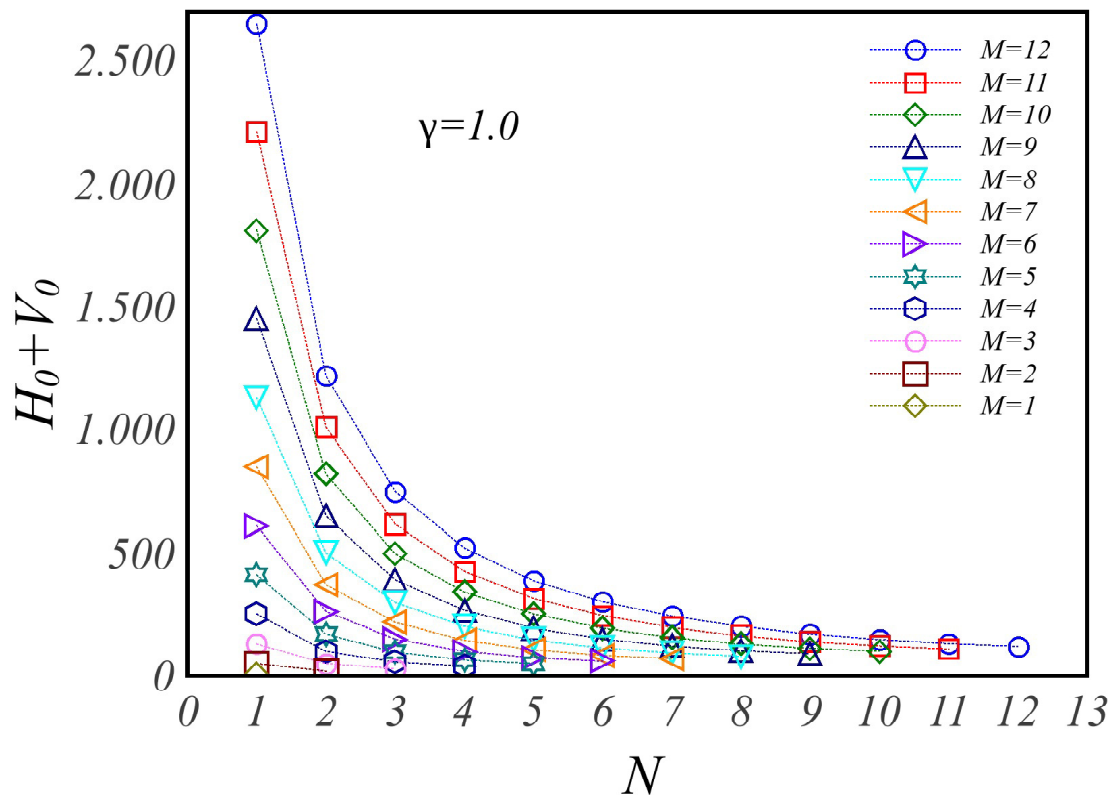


Figura 4.2: Costo total ( $H_0 + V_0$ ) vs. a cantidad de pedidos  $N$  y para tamaño de sistema  $M$  ( $1 \leq M \leq 12$ ) y  $\gamma = 1,0$ . Se observa que cuando la cantidad de pedidos es igual al tamaño del sistema y el costo total es mínimo,  $N_{op} = M$ .

La figura 4.2 muestra la relación entre el costo total y el número de pedidos realizados ( $N$ ) para distintos sistemas de tamaño  $M$  con  $\gamma = 1,0$ . Las cantidades requeridas  $\alpha$  son constantes

en cada periodo. Se observa que cuando  $N = M$ , el costo total es mínimo para todos los casos. Una situación similar debería darse para  $\gamma < 1, 0$ . Esto se debe a que, en este caso, el costo de preparar el pedido es relativamente bajo comparado con el costo de almacenamiento de las cantidades ( $\alpha$ ) requeridas en cada periodo  $i$ , en consecuencia, mantener un inventario mínimo y realizar pedidos con frecuencia reduce el costo total.

La Figura 4.3 muestra un ejemplo ilustrativo en el que se comparan las curvas de costo total para diferentes valores de  $\gamma$ . Se puede observar que, para valores de  $\gamma \leq 1$ , el costo total mínimo se obtiene cuando  $N = M$ . Específicamente, para el caso de  $\gamma = 0,5$  y  $\gamma = 1,0$ , el costo total mínimo se alcanza cuando se realizan 12 pedidos. Por otro lado, cuando  $\gamma$  supera 1, se presenta una situación diferente; en este caso, el costo total mínimo se logra con un número de pedidos menor al tamaño del sistema  $M$ . Esto se debe a que, cuando el costo de preparación de pedido es alto en comparación con el costo de almacenamiento y/o las cantidades requeridas en cada periodo, conviene reducir la cantidad de pedidos y aumentar la cantidad de inventario disponible en cada periodo. En resumen, la Figura 4.3 ilustra cómo el valor de  $\gamma$  afecta el número óptimo de pedidos y el tamaño del inventario en un sistema de inventario. Para valores de  $\gamma \leq 1$ , conviene realizar el mayor número posible de pedidos y mantener un inventario mínimo y para valores de  $\gamma > 1$ , es mejor reducir la cantidad de pedidos y aumentar la cantidad de inventario disponible en cada periodo.

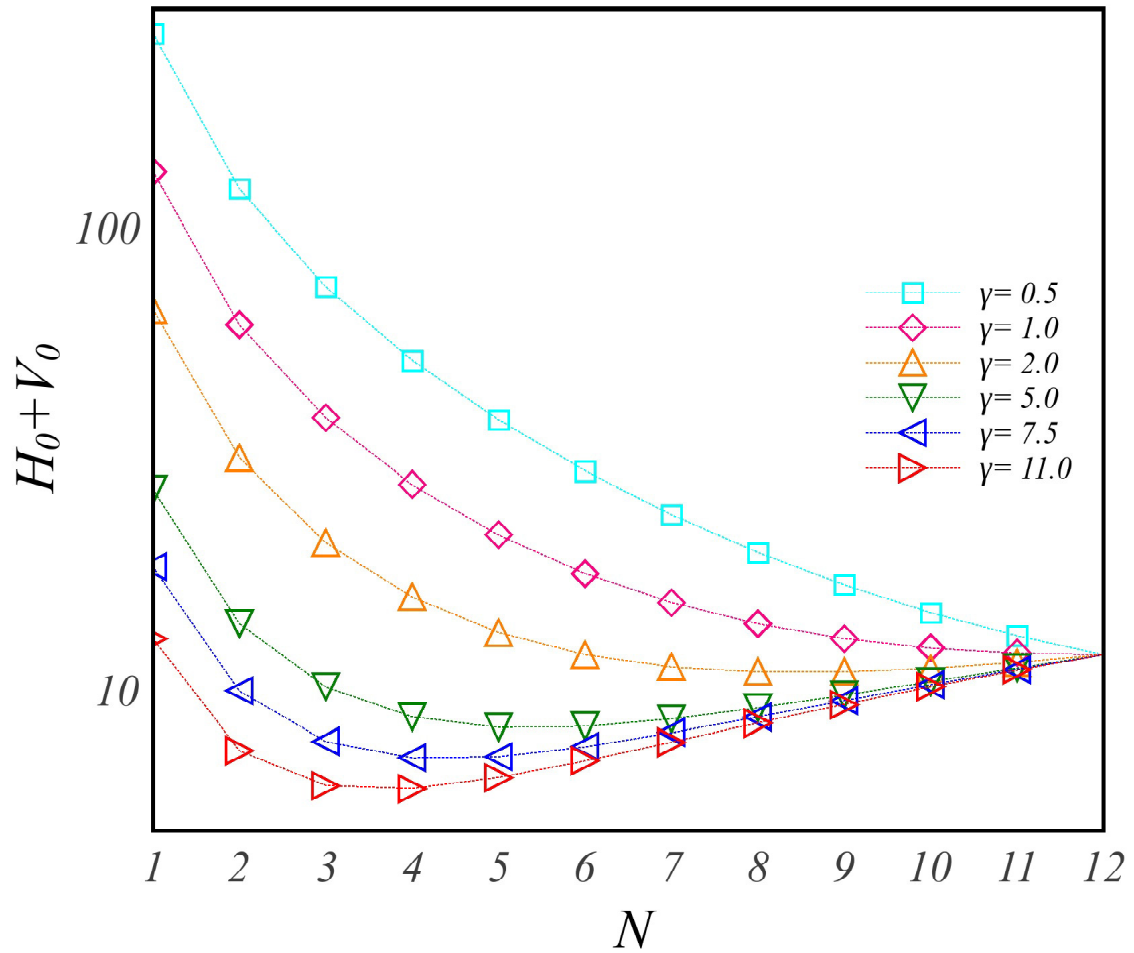


Figura 4.3: Costo total ( $H_0 + V_0$ ) en función del número de pedidos  $N$  para un sistema de tamaño  $M = 12$ ,  $C_p = 1,0$ ,  $\alpha = 1,0$  y  $0,5 \leq \gamma \leq 11,0$ . Los distintos valores de  $\gamma$  se consiguieron variando  $C_m$ :  $C_m = 4,0$  ( $\gamma = 1/2$ );  $C_m = 2,0$  ( $\gamma = 1,0$ );  $C_m = 1,0$  ( $\gamma = 2,0$ );  $C_m = 2/5$  ( $\gamma = 5,0$ );  $C_m = 4/15$  ( $\gamma = 7,5$ ) y  $C_m = 2/11$  ( $\gamma = 11,0$ ).

**$\gamma$  en función del costo de almacenamiento para un horizonte de planificación constante**

En el caso en el que  $\gamma > 1,0$  el costo de pedidos es alto en comparación con el costo de almacenamiento de las cantidades requeridas en cada periodo. En otras palabras, el doble del costo de puesta en marcha ( $2C_p$ ) es superior al costo de almacenamiento multiplicado por las cantidades  $\alpha$  ( $C_m\alpha$ ). Esto implica que el costo de realizar un pedido es relativamente alto en comparación con el costo de mantener un inventario en el sistema. Es importante determinar la mejor política de aprovisionamiento de material para minimizar el costo total del sistema de inventario. En situaciones en las que el costo de pedido es alto en comparación con el costo de almacenamiento y/o las cantidades requeridas en cada periodo (es decir, cuando  $\gamma > 1,0$ ), la cantidad óptima de pedido  $N$  será menor que  $M$  y mayor que 1. La comprensión de esta fenomenología básica requiere el análisis de casos específicos; por ejemplo en la Figura 4.3, se examinan cuatro casos con  $\gamma > 1,0$ , representados por triángulos apuntando hacia arriba, hacia abajo, hacia la derecha y hacia la izquierda, correspondientes a valores de  $\gamma$  de 2,0; 5,0; 7,5 y 11,0; respectivamente. Estos valores de  $\gamma$  se obtuvieron variando el costo de almacenamiento ( $C_m$ ), con valores de  $C_m$  de 1,0; 2/5; 4/15 y 2/11 para los respectivos valores de  $\gamma$ . Todos los casos se realizaron con un sistema de tamaño  $M = 12$ , un costo de establecimiento  $C_p = 1,0$  y una cantidad requerida en cada periodo  $\alpha = 1,0$ . Cuando  $\gamma = 2,0$ ; la relación entre el costo de preparación ( $C_p$ ) y el costo de almacenamiento ( $C_m$ ) es  $C_p/C_m = 1,0$  (véase Ec. 4.13). Además, el número de pedidos con el menor costo total es  $12,0/(\sqrt{2}) \approx 8,485$  (véase Ec. 4.12). Dado que sólo se realiza un número entero de pedidos en un sistema de producción real, la solución óptima es  $N_{op} = 8$ , lo que implica agrupaciones de dos tamaños. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para determinar el valor de los tamaños: si el resultado de la división entera  $M/N_{op}$  es un número entero, todos los agrupamientos tendrán el mismo tamaño  $n_i$ . Por otro lado, si el resto de la división es diferente de cero, la solución óptima incluirá dos

tamaños de agrupamientos. En concreto, habrá  $N_{op} - resto$  tamaño de pedidos  $n_i$  igual a  $M/N_{op}$  y varios agrupamientos de tamaño  $M/N_{op} + 1$ , cada uno con el mismo tamaño que el resto. En el caso que nos ocupa, con  $M = 12$  y  $N_{op} = 8$ , la solución óptima incluye agrupamientos de dos tamaños diferentes. Consecuentemente:

$$\frac{M}{N_{op}} = \frac{12}{8} = 1,5;$$

$$N_{op} - rest = 8 - 4 = 4 \quad (4.17)$$

En definitiva,

$$\frac{M}{N_{op}} + 1 = 1 + 1 = 2. \quad (4.18)$$

Como resultado, la solución implica cuatro grupos de tamaño uno y cuatro grupos de tamaño dos. Esta conclusión indica que, cuando el costo de pedir es mayor que el costo de almacenamiento, es más rentable hacer menos pedidos y almacenar parte de la materia prima en el inventario. Por lo tanto, el número de pedidos es menor que el número de periodos considerados;  $N_{ttop} < M$ . En el caso de  $\gamma = 11,0$ ; la relación entre el costo de pedir ( $C_p$ ) y el costo de almacenamiento ( $C_m$ ) es  $C_p/C_m = 11,0$  (véase Ec. 4.13). Dado que la cantidad óptima de pedidos con el menor costo total es  $12,0/(\sqrt{11}) \approx 3,618$  (véase Ec. 4.12), se tiene  $N_{op} = 4$ . Como  $N_{op}$  es múltiplo de  $M$ , el tamaño de los grupos  $n_i$  es igual para todos. En este caso,  $n_i = \sqrt{\gamma} = \sqrt{11,0} = 3,317$ ; lo que significa que  $n_i$  es igual a 3. Se puede observar que a medida que  $\gamma$  aumenta, la cantidad óptima de pedidos,  $N_{op} = \frac{M}{\sqrt{\gamma}}$ , disminuye. Esto puede indicar que, si el costo de preparación del pedido es mucho mayor que el costo de almacenamiento, es conveniente hacer una menor cantidad de pedidos y almacenar una gran cantidad de materia

prima en el inventario. Para  $\gamma = 11,0$ ; el número de pedidos es mucho menor que el número de periodos considerados,  $N_{op} \ll M$ .

### **$\gamma$ en función de las necesidades para un horizonte de planificación constante**

La modificación del valor del costo de almacenamiento  $C_m$  en la Figura 4.3 provocó un cambio en el parámetro  $\gamma$ . La capacidad de analizar las diferentes formas de modificar  $\gamma$  en sistemas reales resulta muy útil. Este análisis se ha completado en las Figuras 4.4 y 4.5, lo que se convierte en una herramienta valiosa para las organizaciones que buscan mejorar la gestión de sus actividades logísticas. En la Figura 4.4, se presenta un ejemplo adicional que ilustra la complejidad del problema planteado. En un escenario real, el costo de preparación del pedido puede ser similar al costo de almacenamiento, lo que lleva a una disminución en el valor del parámetro  $\alpha$ . Esto se refleja en la Figura 4.4, donde se muestran los costos totales para cuatro valores diferentes de  $\alpha$ :  $\alpha = 0,25$  (triángulos anaranjados),  $\alpha = 2,0$  (triángulos celestes),  $\alpha = 4,0$  (cuadrados) y  $\alpha = 20,0$  (rombos). Los valores correspondientes de  $\gamma$  son:  $\gamma = 8,0$  ( $\alpha = 0,25$ ),  $\gamma = 1,0$  ( $\alpha = 2,0$ ),  $\gamma = 1/2$  ( $\alpha = 4,0$ ) y  $\gamma = 1/10$  ( $\alpha = 20,0$ ). En todos los casos, el tamaño del sistema es  $M = 24$ , y se mantienen constantes los valores de  $C_p$  y  $C_m$  en  $1,0$ .

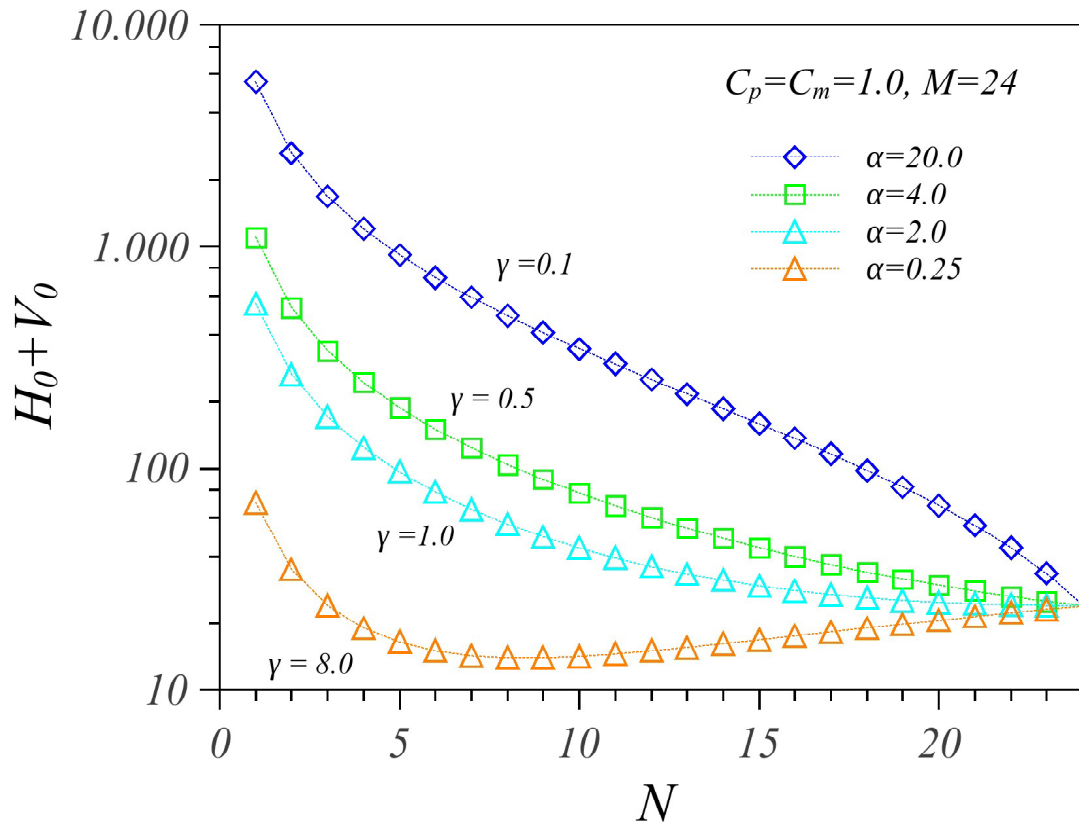


Figura 4.4: Costo total en función del tamaño de los pedidos para  $M = 24$ ,  $C_p = 1,0$ ,  $C_m = 1,0$  y  $0,1 \leq \gamma \leq 8,0$ . Los distintos valores de  $\gamma$  se obtuvieron variando  $\alpha$ :  $\alpha = 20,0$  ( $\gamma = 1/10$ );  $\alpha = 4,0$  ( $\gamma = 1/2$ );  $\alpha = 2,0$  ( $\gamma = 1,0$ ) y  $\alpha = 0,25$  ( $\gamma = 8,0$ ).

En todos los casos estudiados, se observa una disminución del costo total a medida que aumenta el número de pedidos  $N$ , alcanzando un valor mínimo ( $N_{op}$ ). Sin embargo, luego de ese punto, el costo total comienza a aumentar nuevamente, alcanzando un valor definido cuando  $N = M$  (véase Ec. 4.11, donde  $H_0(N = M) + V_0(N = M) = MC_p$ ). Los resultados obtenidos y presentados en la Figura 4.4 indican que al variar únicamente el valor de  $\alpha$ , almacenando

$C_p = C_m$ , se pueden observar dos situaciones distintas: si  $\alpha < 2$ , entonces  $\gamma > 1$  y  $N_{op} < M$ . Por otro lado, si  $\alpha \geq 2$ , entonces  $\gamma \leq 1$  y  $N_{op} = M$ , con  $n_i = 1$ .

#### **$\gamma$ en función del costo de pedir para un horizonte de planificación constante**

Una situación más habitual es cuando el costo de pedir es mucho mayor que el costo de almacenamiento y las cantidades necesarias para el inventario permanecen constantes a lo largo del tiempo ( $\alpha = \text{constante}$ ). Como se espera de la Ec. 4.13, el aumento de  $C_p$  conduce a un aumento de  $\gamma$ . En la Figura 4.5 se presentan algunos casos típicos, donde  $C_m = 1,0$ ,  $\alpha = 1,0$ ;  $M = 24$  y  $1,0 \leq C_p \leq 32,0$ . Los triángulos hacia abajo representan  $C_p = 1,0$ ; los triángulos hacia arriba,  $C_p = 2,0$ ; los triángulos hacia la izquierda,  $C_p = 8,0$  y los triángulos hacia la derecha,  $C_p = 32,0$ . Los valores correspondientes de  $\gamma$  son:  $\gamma = 2,0$  ( $C_p = 1,0$ );  $\gamma = 4,0$  ( $C_p = 2,0$ );  $\gamma = 16,0$  ( $C_p = 8,0$ ) y  $\gamma = 64,0$  ( $C_p = 32,0$ ).

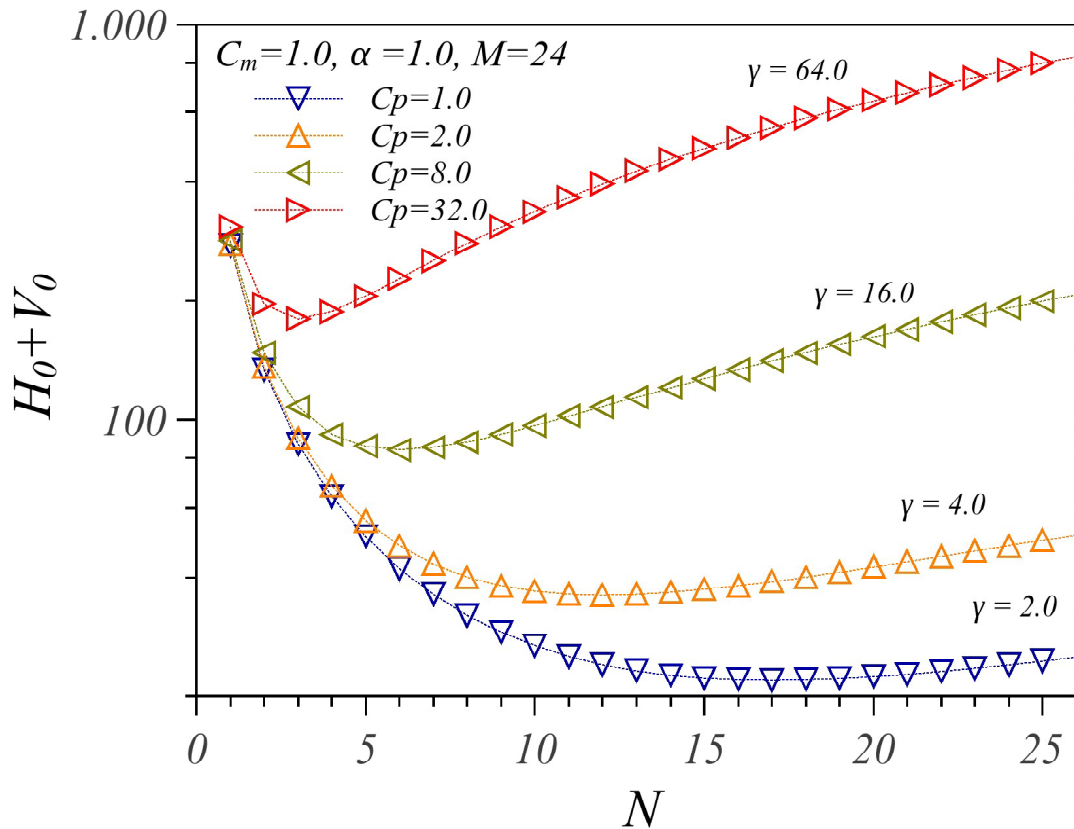


Figura 4.5: Costo total ( $H_0 + V_0$ ) en función de la cantidad de pedidos  $N$  para un sistema de tamaño  $M = 24$ ,  $C_m = 1,0$ ,  $\alpha = 1,0$  y  $2,0 \leq \gamma \leq 64,0$ . Los distintos valores de  $\gamma$  se obtuvieron variando  $C_p$ :  $C_p = 1,0$  ( $\gamma = 2,0$ );  $C_p = 2,0$  ( $\gamma = 4,0$ );  $C_p = 8,0$  ( $\gamma = 16,0$ ) y  $C_p = 32,0$  ( $\gamma = 64,0$ ).

Además, la posición del valor mínimo ( $N_{op}$ ) se desplaza hacia valores más bajos de  $N$  a medida que aumenta  $C_p$ . En el caso actual, los valores de  $N_{op}$  son 17, 12, 6 y 3 para  $C_p = 1,0, 2,0, 8,0$  y  $32,0$ , respectivamente. Asimismo, los valores del costo total óptimo aumentan con  $C_p$ , siendo  $H_{op} = 21,94; 36,0; 84,0$  y  $180,0$  para  $C_p = 1,0; 2,0; 8,0$  y  $32,0$ ; respectivamente. En términos generales, los resultados obtenidos en este estudio preliminar son alentadores. Se

ha logrado obtener nueva información sobre la aplicación de métodos de optimización en el dimensionamiento de lotes de materiales utilizando un sistema elástico.

#### 4.1.2. Validación comparativa entre el modelo propuesto y las distintas técnicas de dimensionamiento de lote

En esta sección se lleva a cabo una comparación del modelo propuesto (OES, por sus siglas en inglés) con otros modelos ampliamente aceptados y desarrollados en la literatura, incluyendo el Algoritmo Wagner-Whitin (W&W), la Programación Lineal Entera Mixta (MILP), One Time Run (OTR), Lote por Lote (LxL), Silver Meal (SM), Cantidad de Pedido Fija (FOQ), y Cantidad de Pedido Periódica (POQ). Además, se compara los resultados con un método desarrollado por Tobares et al. en su documento (Tobares, Narambuena, y Sanchez Varretti, 2017), conocido como Todas las Combinaciones Posibles (TCP).

	W&W	MILP	OTR	LxL	SM	FOQ	APC	OES
Tiempo (s)	0.01879	0.48617	0.00048	0.00019	0.00035	0.00018	0.00316	1.3E-05
%	0.07107	0.00275	2.78607	7.13376	3.8674	7.5067	0.42251	—

Cuadro 4.1: Tiempos de cada modelo para resolver el problema del tamaño de lote para un sistema  $M = 30$ .

En el Cuadro 4.1 se presentan los tiempos de ejecución de cada modelo para resolver el problema de tamaño de lote, así como el porcentaje de tiempo que emplea en el modelo desarrollado en relación con cada uno de los algoritmos utilizados. Se puede observar que el tiempo de ejecución del modelo propuesto es significativamente inferior al de los demás modelos. En particular, los modelos OTR y LxL no proporcionan la mejor solución. Por otro lado, los demás algoritmos logran encontrar la solución óptima al problema.

**Conclusiones parciales del análisis de los resultados de la validación del modelo propuesto en el Sistema Heterogéneo**

En este apartado se ha presentado un modelo de optimización en el dimensionamiento de lotes de materiales mediante un sistema elástico. Se ha establecido que el problema del suministro de materiales es isomorfo con un sistema mecánico unidimensional simple de partículas puntuales conectadas por elementos elásticos. Otro aporte fundamental de este estudio es que no solo se pudo validar el modelo a través de fenómenos físicos, sino que también, se puede resolver el problema de dimensionamiento de lotes a través de una única ecuación sin utilizar algoritmos ni establecer cálculos complejos.

Por otro lado, la validación del modelo utilizando técnicas para determinar el dimensionamiento de lotes ha sido un logro significativo, ya que no solo se llegó a la misma opción óptima, sino que el modelo demostró ser mucho más eficiente en comparación con otros métodos estudiados.

## **Capítulo V**

### **Aplicaciones del Modelo. Casos de estudio**

Efectivamente, uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar un marco para investigadores y fabricantes que pueda ayudar a obtener un método analítico apropiado para el dimensionamiento de lotes. Dicho marco incluirá el modelo propuesto y las técnicas de validación utilizadas, con el fin de ofrecer una guía para la aplicación práctica del modelo. El objetivo final es proporcionar a los fabricantes y profesionales del campo un método preciso y eficiente para el dimensionamiento de lotes que pueda ayudar a optimizar los procesos de producción y reducir los costos asociados.

## **5.1. Industria alimenticia. Producción de frutos secos**

De acuerdo con información proporcionada por el Ministerio de Economía / Agricultura, Ganadería y Pesca, los departamentos de San Rafael y General Alvear son los mayores productores de ciruela desecada destinada a la exportación, lo que los convierte en zonas de gran importancia para la economía regional de la provincia de Mendoza. Según agentes de la Coordinación de Protección Vegetal de la oficina local del Senasa en San Rafael, la producción de ciruela desecada en la región es fundamental. Solo la oficina de San Rafael certificó más de 4.650 toneladas de un total de más de 5.826 toneladas exportadas desde el país durante todo el 2022 (Senasa, 2022). Por estos motivos y debido a su importancia en la economía de la región del sur mendocino, se ha llevado a cabo un estudio de las políticas implementadas por una industria local en este rubro. Además, se ha aplicado el modelo propuesto y se han comparado los resultados obtenidos. En el Apéndice D, se detallan los indicadores relacionados con la producción de frutas secas, con un enfoque particular en la ciruela, que es la variedad predominante cultivada y embarcada por pequeños productores. Estos indicadores ofrecen información clave sobre la actividad de estos productores y su contribución al sector de frutas secas (Véase Apéndice E).

### **Problemática**

El fabricante adquiere fruta deshidratada de proveedores locales en diferentes cantidades, lo que genera una alta variabilidad en las compras. Además, la adquisición de esta materia prima se realiza en función de las necesidades que impone el mercado, sin que se controle o estandarice el momento de entrega de los proveedores. Esta situación plantea una oportunidad para aplicar un nuevo desarrollo, con el objetivo de organizar de manera más eficiente la adquisición de las materias primas. Al implementar el modelo propuesto, el fabricante puede optimizar el tamaño de sus lotes en función de sus necesidades de producción y la variabilidad en las entregas de sus proveedores, lo que resulta una gestión de compras más eficiente y rentable, mejorando así la rentabilidad del fabricante. En resumen, esta nueva metodología puede ayudar al fabricante a mejorar la gestión de sus compras y reducir los costos asociados a la adquisición de materias primas.

### **Implementación del modelo**

Ahora se aplica el enfoque teórico propuesto para comparar los costos totales del modelo propuesto con los costos totales de la política de suministro llevada a cabo por la empresa del medio. Para ello, se definen diferentes políticas de suministro y se evalúan los costos totales de cada una de ellas. La capacidad diaria de producción de ciruela seca de la compañía es de aproximadamente 6.500 Kg. Durante la temporada baja, el proceso productivo mensual se desarrolla a lo largo de 21 días laborales, considerando un solo turno de trabajo de 8 horas. Por otro lado, la empresa tiene un costo de preparación del pedido de  $C_p = 2563$  y un costo de almacenamiento de  $C_m = 0.0549$  por unidad por día. Entonces a partir de la explicación previa, se comparan los costos totales de dos agrupamientos de pedidos con los de tres agrupamientos de pedidos para un horizonte de planificación  $N = 21$ . (Figura 5.1)

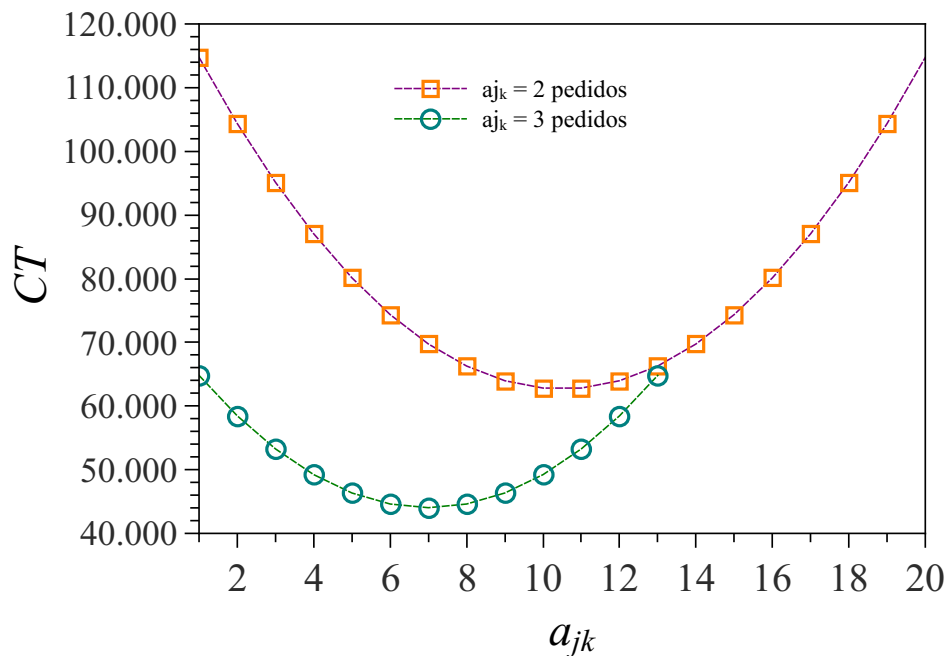


Figura 5.1: Comparación entre los costos totales ( $CT$ ) en función de los tamaños de agrupamientos ( $a_{jk}$ ) en un sistema  $N = 21$  para dos y tres agrupamientos de pedidos.

El estudio de casos permite comparar ambas políticas de suministro en función del costo total y del número de pedidos. Se observa que para la política de tres agrupamientos de pedidos, los costos totales son inferiores en todo el rango de análisis. En esta política, se mantuvo constante uno de los agrupamientos en  $a_{jk} = 7$ ; sin embargo, es necesario analizar otras políticas de suministro.

En la Figura 5.2 se presenta la evolución del inventario neto de materiales almacenados en relación a los días. Los círculos llenos reflejan la cantidad de materia prima almacenada siguiendo la política de compras actual de la empresa. Se puede apreciar que la empresa incrementa la cantidad de almacenamiento mediante nuevas compras, incluso si ya dispone de suficiente materia prima para su producción; este comportamiento ineficiente conlleva un aumento inne-

cesario en los costos de mantenimiento de la empresa.

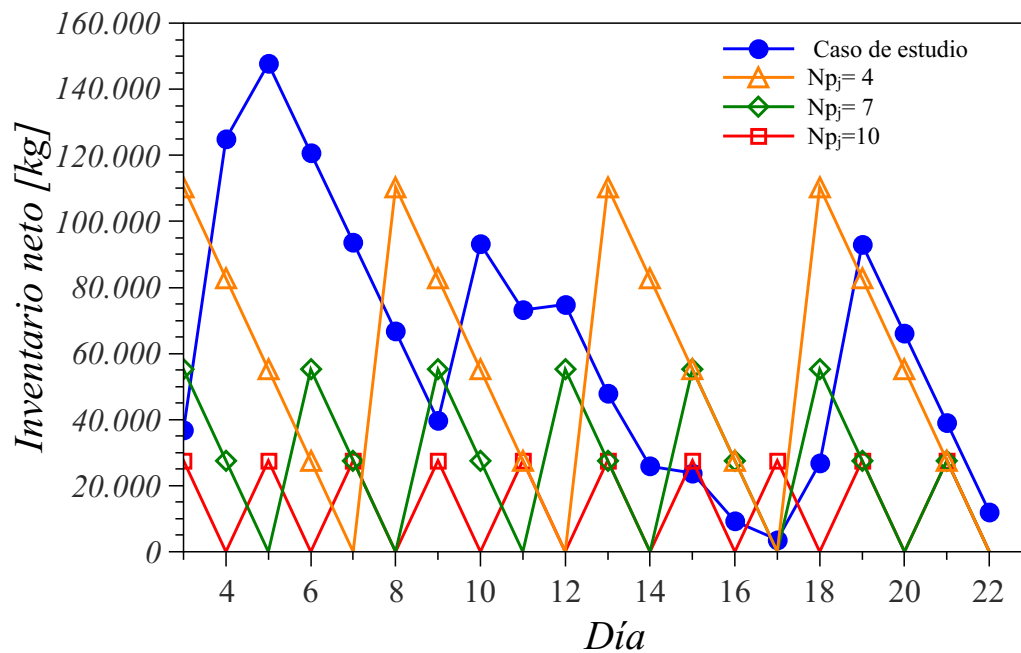


Figura 5.2: Inventario neto del material almacenado para diferentes políticas de pedidos.

En cambio, los otros símbolos en la Figura 5.3 representan la cantidad de material almacenado bajo las políticas de compra propuestas por la metodología presentada en esta Tesis, con valores de  $N_{p_j}$  de 4, 7 y 10. Se puede observar que la cantidad de inventario aumenta solo cuando se agota la materia prima para la producción, lo que conduce a menores costos de mantenimiento.

La Figura 5.3 ilustra la evolución del costo total en función de los días. Los círculos llenos indican el costo total acumulado siguiendo la política de compras actual de la empresa, donde se observa una gran variabilidad de pedidos en la compra de frutos secos, lo que genera un aumento de los costos totales en función de los días (ver Figura 5.2). Por otro lado, los demás símbolos representan el costo total acumulado siguiendo las políticas propuestas por la metodología pre-

sentada en este trabajo. Se observa que para un pedido para todos los procesos ( $Np_j = 1$ ) el costo total es máximo, mientras que para diez pedidos para todos los procesos ( $Np_j = 10$ ) el costo total es mínimo. Asimismo, para  $Np_j = 20; 7; 4$ , los costos totales no son mínimos, pero son inferiores a la política de compra de la empresa. En general, se puede concluir que el costo de mantenimiento es alto, por lo que la solución óptima se encuentra en pequeñas cantidades constantes de aprovisionamiento de material ( $Np_j = 10$ ).

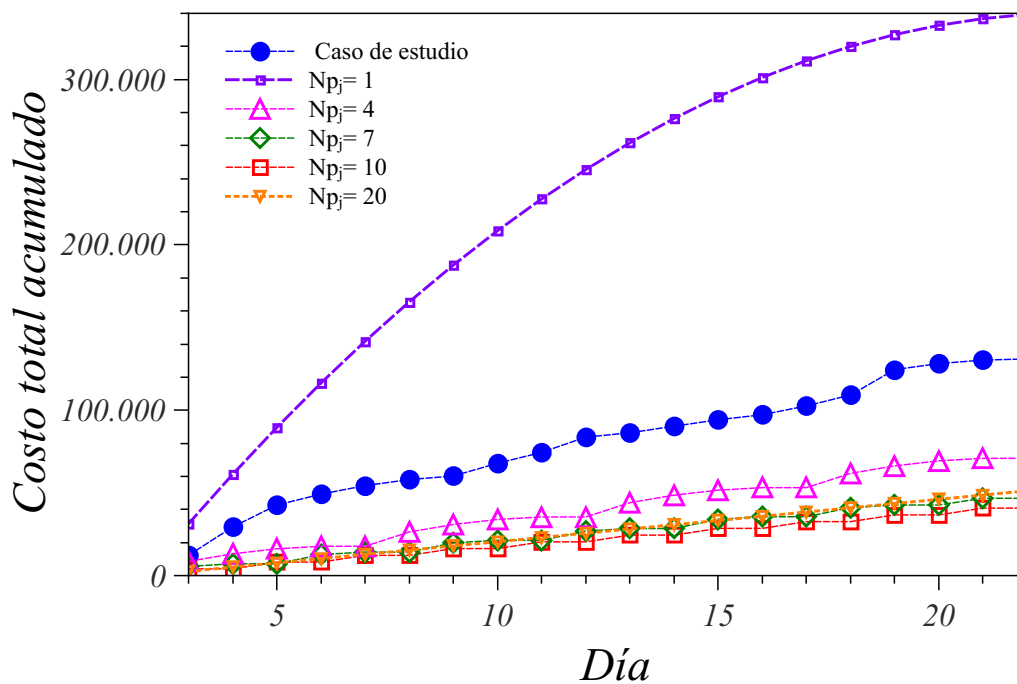


Figura 5.3: Costo total acumulado en función del tiempo.

Se puede interpretar que realizar pedidos del mismo tamaño tiene un efecto positivo en la reducción de los costos totales acumulados. La aplicación de este modelo a un caso práctico específico demuestra que hay grandes beneficios para la compañía, al adoptar esta política de suministro.

**Procesamiento de datos. Implementación de BI (Business Intelligence) en el contexto en estudio**

Siguiendo el mismo caso de estudio, a partir de los resultados obtenidos es oportuno incorporar herramientas de Inteligencia de Negocios que son usadas para contribuir en la mejora de toma de decisiones en diferentes ámbitos, por ejemplo en PyMEs.

La variación existente de los valores en los parámetros a tener en cuenta para la planificación de la compra de materia prima en la elaboración de ciruelas deshidratadas, ocasiona una gran generación de datos. La empresa en estudio acumula datos que resultan de interés, pero hace un uso limitado de ellos. Básicamente reportes estandarizados que muestran datos mínimos, tabulados y no estructurales, que no brindan un valor y complican al momento de tomar una decisión basada en estos. Los reportes o informes que proporciona el actual sistema informático TANGO no dan una visión clara y sencilla de la situación de la empresa, o en su defecto, no es información consolidada o resumida de tal manera que los tomadores de decisiones puedan tener conocimiento claro de la situación actual. La empresa no dispone de información ágil y oportuna para el departamento de Compras e Inventarios que permita la gestión de dichas áreas. La información existente es generada manualmente por los encargados de los departamentos, por tanto, no es completamente confiable ni suele ser la actualizada; todo esto constituye una desventaja competitiva al momento de tomar decisiones. A partir de allí se aplica herramientas de Inteligencia de Negocios para este tipo de estudio particular. Existen varias herramientas en el que se nombra algunas de ellas, Microsoft Dynamics NAV, Microstrategy Intelligence (Mamani, 2018) , Microsoft Power BI (Iñigo, Gerrikagoitia, y Aurkene, 2013), Oracle BI (Ward, Screen, y Khan, 2017), SAP Business Objects (Cámara Núñez, 2010) etc. En este caso, se estima que la herramienta que mejor se adecua es Power BI.

Con la utilización de datos proporcionados por la empresa sobre compras realizadas a dis-

tintos productores, se procedió a su análisis a través Power BI. A continuación, se describen los pasos a seguir para la implementación de la herramienta de Inteligencia de Negocio.

En primera instancia, tal como se menciona anteriormente se importa datos de la empresa a través de sistema Tango por medio de tablas de Excel. En la siguiente Figura 5.4 se puede apreciar la lectura de la tabla en el Power BI con los datos históricos de los últimos meses sobre la participación de productores en la venta de ciruela seca (Kg) a la compañía en estudio.

Productores	Enero (kg)	Febrero (kg)	Marzo (kg)	Abril (kg)	Mayo (kg)	Junio (kg)	Julio (kg)	Agosto (kg)	Septiembre (kg)	Octubre (kg)	Noviembre (kg)	Diciembre (kg)
1. Mendoza	22900	3034	0	0	4200	43540	0	0	0	0	0	26080
2	22854	22280	8394	0	5836	5470	54472	0	28080	22980	0	0
3	22628	23420	2004	2004	49726	24980	3740	24780	8479	26375	20256	0
2 Mendoza	30266	212786	2002	0	7477	24246	0	0	0	0	0	8640
5	27900	46230	22060	2002	442	43540	1244	0	72402	24780	7619,11	0
6	4632	0	2000	22315	12980	24246	0	8920	22300	22100	0	0
7	21500	0	30298	24283	15815	80437	0	37280	23570	0	7893	0
8	94490	0	30220	9993	34719	242502	10900	35923	9236	92990	2650	0
3 Mendoza	0	0	26920	0	33344	0	0	0	5994	0	12942	0
4 Mendoza	0	0	4029	0	0	0	0	0	0	704	110480	0
5 Mendoza	0	0	8394	0	0	0	12890	0	0	224420	27000	0
6 Mendoza	0	0	0	30220	0	0	0	39490	0	27220	0	0
7 Mendoza	0	0	0	2620	0	0	0	22370	0	23820	0	0
8 Mendoza	0	0	0	23233	0	0	0	24020	0	11062	0	0
9 Mendoza	0	0	0	48053	24220	0	0	24390	0	0	0	0
9	0	0	26920	2194	22620	5000	0	53804	0	800	21120	0
10	0	0	0	2540	7477	25020	4520	7860	12685	0	0	0
11	0	0	0	2817	49636	7000	11520	28890	687	0	0	0
12	0	0	0	5912	1243	6048	1244	0	3947	0	0	0
13	0	0	0	0	8580	12420	5220	17958	18540	0	0	0
14	0	0	0	0	8373	15488	22325	22220	24520	0	0	0
15	0	0	0	0	0	8580	0	48680	22929	0	0	0
16	0	0	0	0	0	78180	0	600	1361	0	0	0

Figura 5.4: Costo total acumulado en función del tiempo.

Se puede ver, que el programa permite obtener resultados sobre aquellos productores que han aprovisionado mayor cantidad de kilos de ciruela seca a la empresa, Figura 5.5 y 5.6.

Cabe destacar que la compañía realiza el proceso de compra en dos zonas fundamentales de la Provincia de Mendoza, denominadas Zona Sur: San Rafael, Alvear y Malargüe y por otro lado Zona este: Santa Rosa, La Paz, San Martín, Junín, Rivadavia, Maipú. También se pudo determinar la clasificación de productores que mayor cantidad kilos de ciruela han aprovisionado

a la Industrial local regional. En la Figura 5.5 se aprecian los productores de la Zona Sur y en la Figura 5.6 se observa productores de Zona Este.

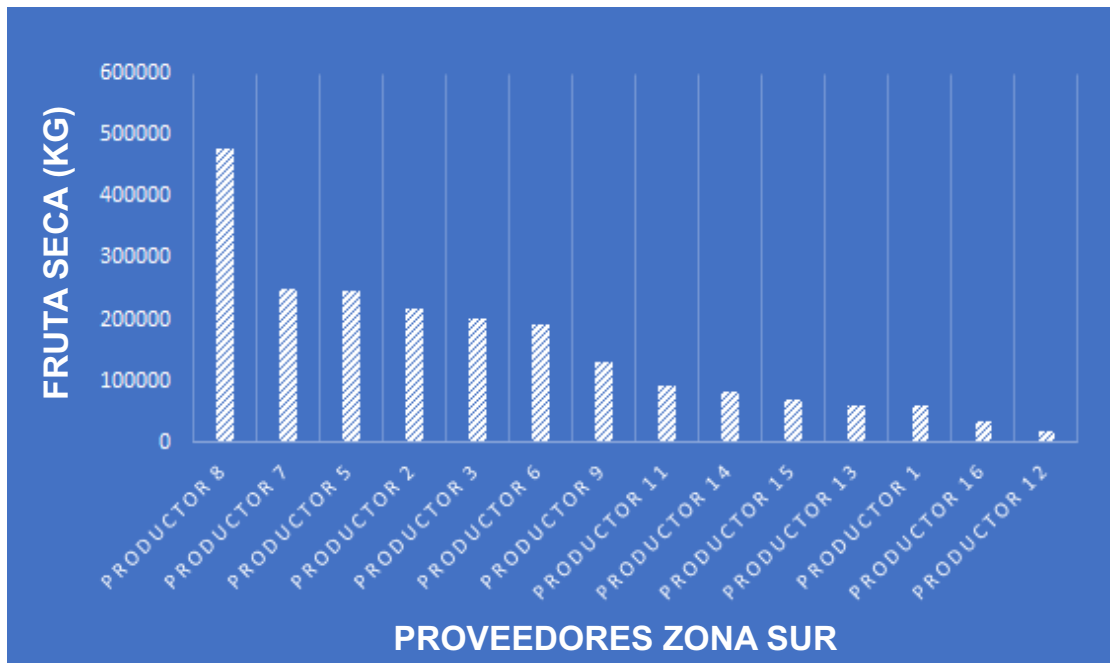


Figura 5.5: Proveedores de la zona sur de Mendoza en función de la cantidad en *kg* de fruta seca.



Figura 5.6: Proveedores de la zona este de Mendoza en función de la cantidad en *kg* de fruta seca.

### Conclusiones parcial

- La compañía actualmente adquiere fruta deshidratada de proveedores locales en diferentes cantidades, lo que resulta en una alta variabilidad en las cantidades adquiridas. Además, la cantidad comprada también depende de las necesidades del mercado en ese momento. La llegada de la materia prima a la empresa no está estandarizada ni controlada. En este contexto, surge la oportunidad de aplicar un modelo de planificación y organización de la adquisición de materias primas para abastecer la demanda en el momento adecuado. La planificación adecuada es crucial para la producción y requiere la exploración de diversas técnicas alternativas de organización.

- Se puede observar que al ser una industria con gran cantidad de proveedores la implementación de herramientas BI resultan de gran utilidad. Se detecta una gran generación de datos que deben ser tenidos en cuenta para lograr un abastecimiento estratégico. Por ejemplo, los resulta-

dos arrojados por el programa muestran que si bien existen un gran abanico de proveedores uno sólo es capaz de aprovisionar la misma cantidad varios pequeños productores. Esta información es de gran utilidad, ya que ayudaría a tomar buenas decisiones luego de conocer las opciones de realizar los pedidos con menores costos. Es por ellos, que la empresa debería planificar estratégicamente la gestión de compra dándoles mayor importancia a este tipo de proveedores

## **5.2. Industria alimenticia. Producción de pulpa concentrada**

En el estudio de caso se utilizaron datos de una planta de procesamiento de pulpa concentrada ubicada en el Parque Industrial de San Rafael, Mendoza, Argentina. La empresa se dedica al procesamiento de diversas frutas como tomate, durazno, zapallo, ciruela, entre otras. El envase, denominado bolsa de polietileno, utilizado para el envasado de pulpa, es uno de los productos de mayor interés en la empresa debido a su alta rotación; este insumo es el utilizado en el presente estudio.

### **Problemática**

La empresa carece de un sistema actualizado de control de inventario y de un sistema de gestión de stocks, que permita un seguimiento de inventario y minimizar los costos. Actualmente, se utiliza una hoja de cálculo de excel donde se registran los ingresos de los insumos por parte de quien los recibe. Sin embargo, este registro no está completamente actualizado y no se controla de manera rigurosa.

### 5.2.1. Implementación del modelo

La capacidad diaria de la producción de pulpa concentrada es de 40000 Kg por día, esto equivale a una demanda de 174 bolsas diarias que se necesitan para el empaque del producto final. El proceso productivo mensual se desarrolla a lo largo de 30 días laborales, considerando un solo turno de trabajo de 8 horas. Por otra parte, la empresa tiene un costo de preparación del pedido de  $C_p = 477,22$  y un costo de almacenamiento de  $C_m = 0.054$  por unidad por día.

En este apartado se realiza una comparación de costos entre la estrategia actual de la empresa y la propuesta en esta Tesis. Es importante destacar que el análisis se lleva a cabo utilizando el modelo obtenido en el estudio del comportamiento del sistema elástico del resorte. La empresa proporcionó los datos del costo total acumulado con su estrategia de suministro, que se muestra con el símbolo de un cuadrado de la Figura 5.7. Por otro lado, el círculo representa el costo total acumulado al aplicar la estrategia propuesta de aprovisionamiento utilizando el modelo desarrollado en este trabajo.

$$\gamma = \frac{2C_p}{C_m \alpha} = \frac{2 * 477,22}{0,05452 * 174} = 100,6095$$

$$N_{op} = \frac{M}{\sqrt{\gamma}} = \frac{30}{\sqrt{100,6095}} = 2,991$$

$$n_i = \sqrt{\gamma} = \sqrt{100,6095} = 10,030$$

Por lo tanto, deben realizarse tres pedidos de tamaño 10, con un costo total de

$$H_{op} = C_p M \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma} = 2712,336.$$

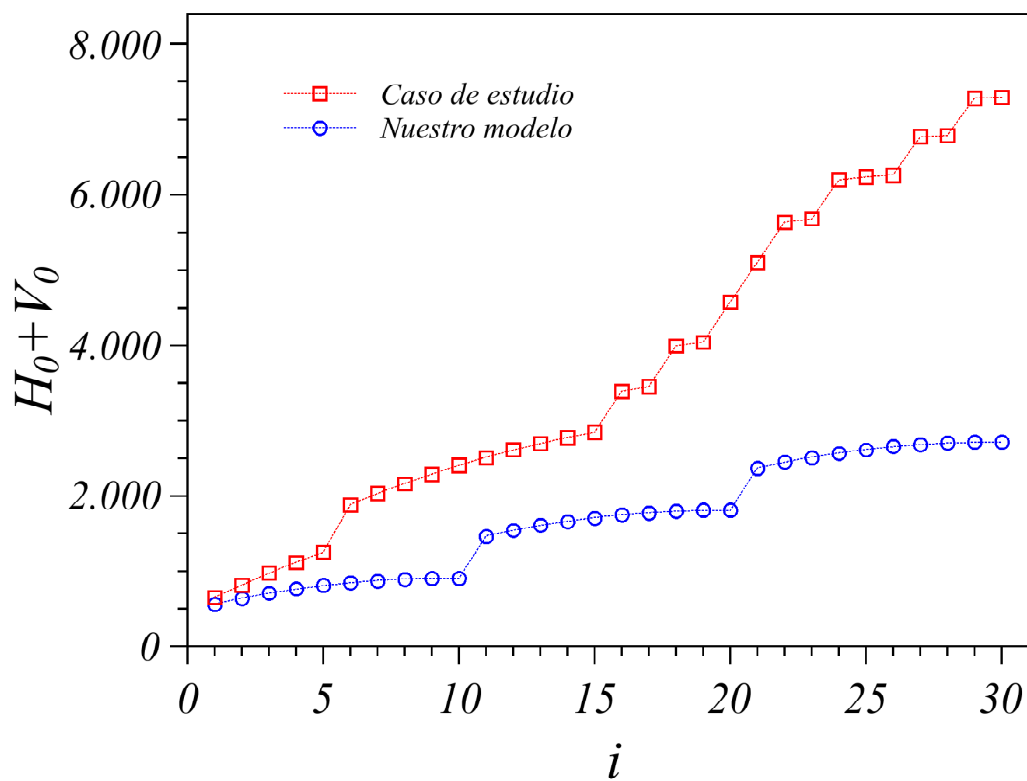


Figura 5.7: Costo total ( $H_0 + V_0$ ) acumulado en función de los periodos  $i$  sobre la política de la empresa y el modelo propuesto.

En la Figura 5.7 se puede observar que realizar tres pedidos del mismo tamaño resulta en una notable disminución de los costos, mientras que realizar múltiples pedidos de cantidades

variables resulta en costos elevados. La estrategia propuesta en este trabajo tiene un costo menor que la estrategia actual de la empresa.

Por otro lado, en este estudio de caso, se compararon diversas técnicas de dimensionamiento de lotes, junto con la política actual de la empresa y el modelo propuesto en esta Tesis, utilizando los datos obtenidos de la compañía (Cuadro 5.1). El objetivo del análisis fue determinar la metodología que generaba el menor costo para el abastecimiento de los requerimientos de materiales y a continuación se detallan los resultados obtenidos:

Metodología aplicada	Costo Total para 30 días (\$)
Modelo EOQ	3.588,31
Modelo lote x lote	14.316,58
Modelo Balance Parcial del periodo	2.739,58
Modelo Propuesto	2.711,15
Política de la empresa	7.291,61

Cuadro 5.1: Resumen del análisis comparativo del costo total entre diferentes técnicas del dimensionamiento de lote y modelo propuesto

### Conclusiones parciales

En conclusión, la metodología desarrollada ha demostrado excelentes resultados. En primer lugar, a través de un modelo sencillo se puede identificar de manera eficiente la mejor propuesta de política de suministro, lo que ayuda en la toma de decisiones en las PyMEs. En segundo lugar, al comparar diferentes metodologías de dimensionamiento de lotes utilizando la misma base de datos, se obtuvo que la metodología propuesta en esta Tesis arrojó el menor costo total en comparación con las demás metodologías.

### **5.3. Industria Manufacturera. Producción de envases de polietileno de baja densidad**

El caso que se analiza es una industria local del medio. Desde sus orígenes se ha dedicado a la transformación de polietileno de baja densidad por proceso de extrusión. Dentro del espectro de transformadores se encuentra orientado como proveedor de varias industrias, Es importante destacar que en este caso de estudio los cálculos realizados fueron a través del algoritmo computacional propio para administrar las políticas de suministro (Véase Sección 3.3.). Debido a que los requerimientos de materiales son variables en cada periodo.

#### **Problemática**

En la actualidad, la empresa carece de un sistema de gestión de inventarios eficiente que facilite la gestión de compras. En su lugar, se utiliza una hoja de cálculo de Excel en la que se registran los ingresos de los insumos por parte de quienes los reciben. Sin embargo, esta base de datos no se encuentra completamente actualizada y por lo tanto no existe control exhaustivo del material.

#### **5.3.1. Implementación del modelo**

El presente estudio muestra soluciones de un método analítico para el problema de tamaño de lote del insumo seleccionado: Masterbatch blanco. Históricamente se compran entre 9.000 y 10.000 Kg de máster blanco en el mes intercalando las compras entre dos proveedores, dependiendo del precio y stock del insumo. Generalmente se realizan dos compras al mes: la primera de manera tal que llegue los primeros días y la segunda para que llegue a mediados de mes. Cuando arriba esta compra, se verifica con los consumos si es necesario realizar otra compra

adicional antes de finalizar el mes. El análisis se realiza teniendo en cuenta los consumos reales del insumo durante los meses de julio y agosto de 2022 que se detallan en el siguiente cuadro:

Id Producto	Descripción Flex	Kg.	Fecha
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	200,0	01/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	125,0	04/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	750,0	05/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	275,0	06/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	150,0	07/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	400,0	08/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	575,0	09/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	525,0	12/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	500,0	13/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	225,0	16/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	350,0	17/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	350,0	18/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	250,0	19/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	525,0	19/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	125,0	20/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	200,0	20/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	525,0	21/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	300,0	22/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	100,0	24/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	250,0	24/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	425,0	25/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	125,0	25/07/22
10029210	MASTERBATCH BLANCO 8160 W	250,0	26/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	250,0	30/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	125,0	31/07/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	100,0	01/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	550,0	02/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	475,0	03/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	300,0	04/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	225,0	06/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	400,0	07/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	525,0	08/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	475,0	09/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	600,0	10/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	150,0	11/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	200,0	14/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	375,0	15/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	500,0	20/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	400,0	21/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	575,0	22/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	425,0	23/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	750,0	24/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	125,0	25/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	425,0	26/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	100,0	28/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	850,0	29/08/22
10020007	MASTERBATCH BLANCO 911088	475,0	30/08/22

Figura 5.8: Consumo de Masterbatch blanco julio-agosto 2022.

El tiempo que lleva generar la solicitud de compras es variado ya que los controles de stock se hacen semanalmente. Esto se ha valuado en un costo operativo de pedir de  $C_p = \$ 5.000$ . Los tiempos operativos de descarga y almacenaje han sido valuados en  $\$ 20.000$  por cada 5.000 Kg, entonces:  $C_m = 20.000 \$ / 5.000 \text{ Kg} / 15 \text{ días} = 0.266667 \$ \text{ día} / \text{Kg}$ . Utilizando el consumo del mes de julio de 2022, se encuentra que las mejores 10 estrategias de pedido para cumplir con los requerimientos del insumo Masterbatch blanco son:

	CT	1° pedido		2° pedido		3° pedido	
1(*)	22540	16	3725	14	4025		
2	22713	15	3500	15	4250		
3	23033	11	2475	7	1950	12	3325
4	23053	17	4075	13	3675		
5	23246	7	1500	10	2575	13	3675
6	23293	7	1500	11	2925	12	3325
7	23359	11	2475	6	1600	13	3675
8	23366	8	1900	10	2525	12	3325
9	23386	7	1500	9	2225	14	4025
10	23413	8	1900	9	2175	13	3675
		Periodos abarcados	Kg. pedidos	Periodos abarcados	Kg. pedidos	Periodos abarcados	Kg. pedidos

Figura 5.9: Estrategias de abastecimiento con menor costo – datos julio 2022.

(\*) La opción óptima, primera línea de la Figura 5.9, indica que se deben realizar dos pedidos, uno de 3725 Kg para cumplir con los requerimientos de los primeros 16 periodos y el segundo de 4050 Kg para cumplir con los 14 restantes: Utilizando el consumo del mes de agosto de 2022, se encuentra que las mejores 10 estrategias de pedido para cumplir con los requerimientos del insumo Masterbatch blanco son:

	CT	1° pedido		2° pedido		3° pedido	
<b>1(*)</b>	<b>23426</b>	<b>19</b>	<b>4375</b>	<b>11</b>	<b>4625</b>		
<b>2</b>	24066	6	1650	13	2725	11	4625
<b>3</b>	24086	7	2050	12	2325	11	4625
<b>4</b>	24493	5	1425	14	2950	11	4625
<b>5</b>	24586	7	2050	13	2725	10	4125
<b>6</b>	24586	8	2575	11	1800	11	4625
<b>7</b>	24659	18	4375	12	4625		
<b>8</b>	24699	6	1650	14	3225	10	4125
<b>9</b>	24859	20	4875	10	4125		
<b>10</b>	24953	8	2575	12	2300	10	4125
		<b>Periodos abarcados</b>	<b>Kg. pedidos</b>	<b>Periodos abarcados</b>	<b>Kg. pedidos</b>	<b>Periodos abarcados</b>	<b>Kg. pedidos</b>

Figura 5.10: Estrategias de abastecimiento con menor costo – datos agosto 2022.

(\*) La opción óptima, primera línea de la Figura 5.10, indica que se deben realizar dos pedidos, uno de 4375 Kg para cumplir con los requerimientos de los primeros 19 periodos y el segundo de 4625 Kg para satisfacer las necesidades de los 11 periodos restantes.

### Conclusiones parciales

A partir de los datos otorgados por la empresa, la realización del análisis establece que para el mes de julio de 2022 hay 2 estrategias que arrojan los menores costos e indican que se deben realizar dos pedidos (la óptima: uno de 3725 Kg y otro de 4025 Kg). Sin embargo, la realización de tres pedidos no implica un gran incremento de costos. La organización podría optar por estas alternativas si desde el punto de vista práctico le resulta más beneficioso (Véase Figura 5.11). El cálculo con los datos del mes de agosto de 2022 arroja que las 10 mejores estrategias de abastecimiento implican la realización de dos y tres pedidos. La mejor opción comprende un pedido de 4375 Kg para cumplir con los requerimientos de los primeros 19 periodos y otro

de 4625 Kg para satisfacer los 11 periodos restantes, incurriendo en un costo de \$ 23.426. La política de la empresa de planificar la recepción de insumos los días 1 y 15 de cada mes implica un costo de \$ 28.360, es decir un incremento del 21 %, esto debido al mantenimiento de materiales durante días que no son requeridos por la línea de producción (Véase Figura 5.12).

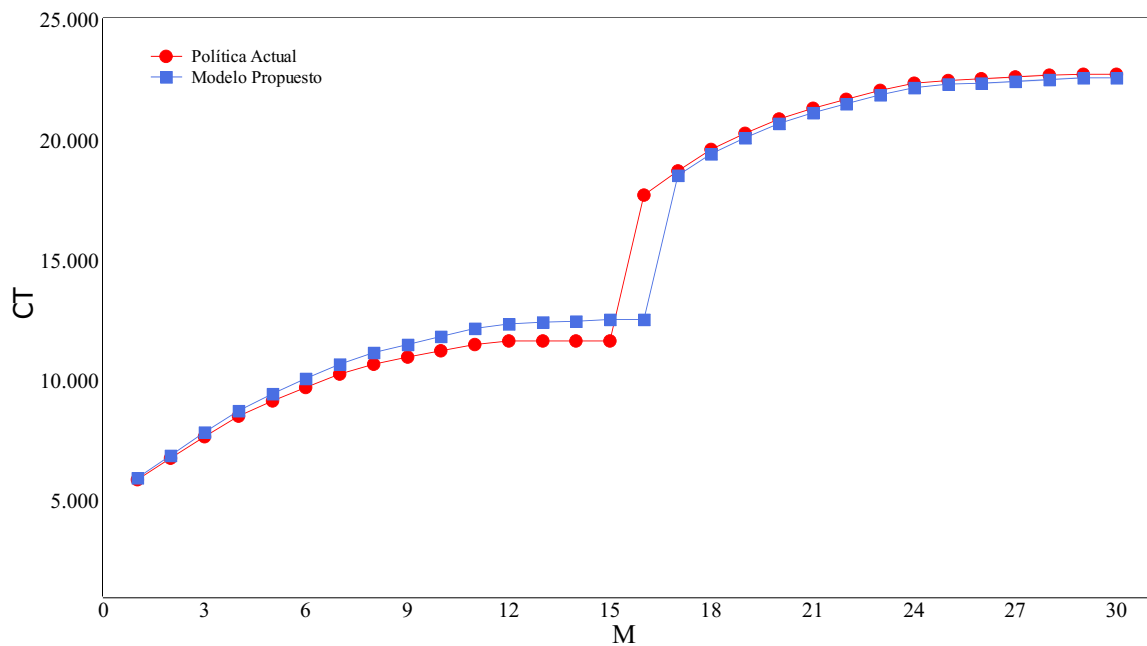


Figura 5.11: Comparativa de costos totales (CT) en función del horizonte de planificación  $M = 30$ ; entre política actual de la empresa y modelo propuesto – Julio 2022.

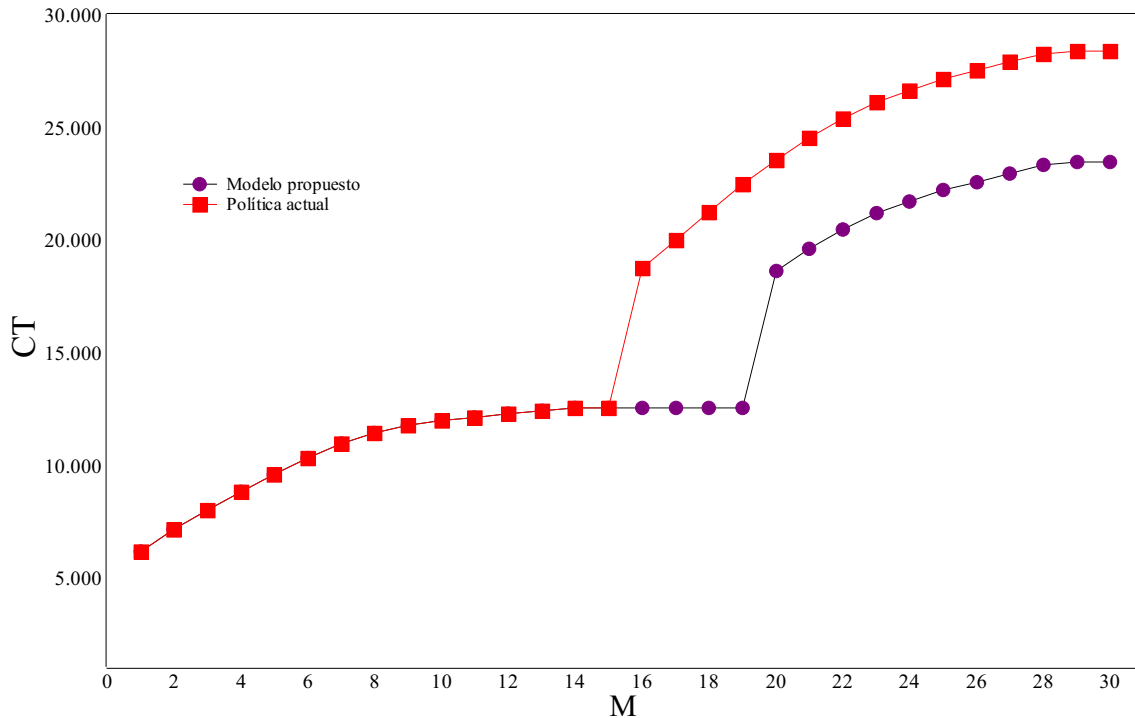


Figura 5.12: Comparativa de costos totales (CT) en función del horizonte de planificación  $M = 30$ ; entre política actual de la empresa y modelo propuesto – Agosto 2022.

## 5.4. Plataforma digital - Política de abastecimiento de material

Uno de los objetivos establecidos en la Tesis fue diseñar una plataforma digital que estuviera disponible en la nube. Para lograrlo, se desarrolló una plataforma basada en el algoritmo propuesto, capaz de calcular el costo total para cada combinación dentro de un horizonte de planificación. En términos técnicos, es importante mencionar que el backend fue desarrollado utilizando PHP puro. Por otro lado, el frontend utilizó el framework jQuery para el mane-

jo de elementos del DOM, incluyendo actualizaciones mediante Ajax. Además, se empleó la librería Bootstrap para el diseño y presentación de la plataforma web. El link de acceso es [https : //atuelsoft.com/test\\_fabricio/](https://atuelsoft.com/test_fabricio/). A continuación, se describe paso a paso la funcionalidad de la plataforma:

1- En el menú principal, es necesario desplegar la sección *Cantidad de Periodos* y luego elegir el número, teniendo en cuenta el horizonte de planificación bajo análisis.

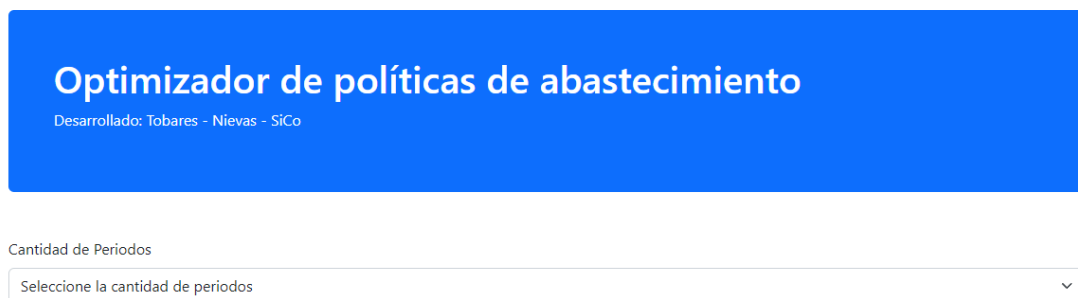
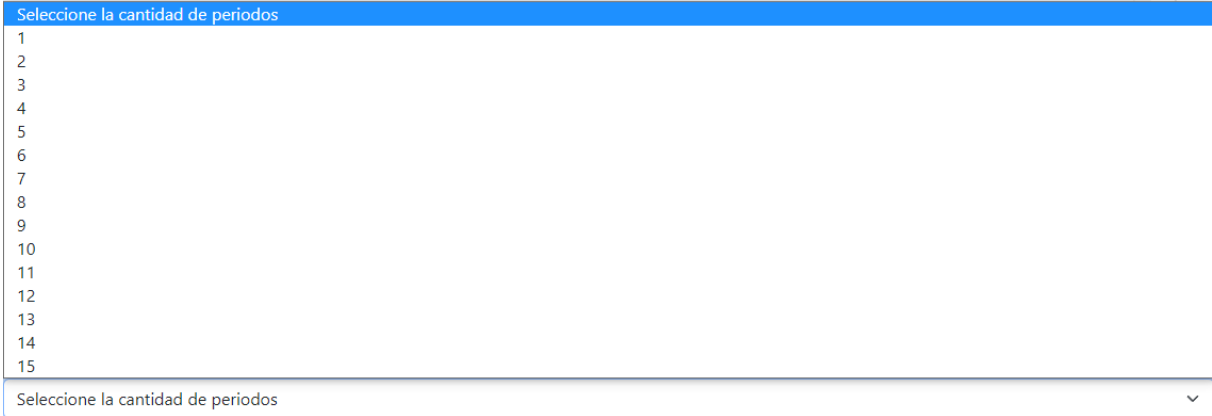


Figura 5.13: Pantalla de la plataforma digital. Despliegue de periodos.



Seleccione la cantidad de periodos

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15

Seleccione la cantidad de periodos

Figura 5.14: Pantalla de la plataforma digital. Selección de periodos.

2- Después, se debe ingresar el valor que represente la cantidad de requerimientos de materiales que deben satisfacerse en cada periodo correspondiente.



**Optimizador de políticas de abastecimiento**  
Desarrollado: Tobares - Nievas - SiCo

Cantidad de Periodos  
10

Cantidad de unidades por periodo

Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4
Valor 5	Valor 6	Valor 7	Valor 8
Valor 9	Valor 10		

Costo por Pedido  
Costo Pedido

Costo de almacenamiento por unidad  
Costo Almacenamiento

Figura 5.15: Pantalla de la plataforma digital. Despliegue de los valores de los requerimientos para  $N=10$ .

**Optimizador de políticas de abastecimiento**  
Desarrollado: Tobares - Nievas - SiCo

Cantidad de Periodos  
10

Cantidad de unidades por periodo

120	120	120	120
120	120	120	120
120	120		

Costo por Pedido  
Costo Pedido

Costo de almacenamiento por unidad  
Costo Almacenamiento

Figura 5.16: Pantalla de la plataforma digital. Descripción de los valores de los requerimientos para  $N=10$ .

3- Luego, se deben ingresar los valores de costo de pedido y costo de almacenamiento por cada unidad.

Cantidad de Periodos  
10

Cantidad de unidades por periodo

120	120	120	120
120	120	120	120
120	120		

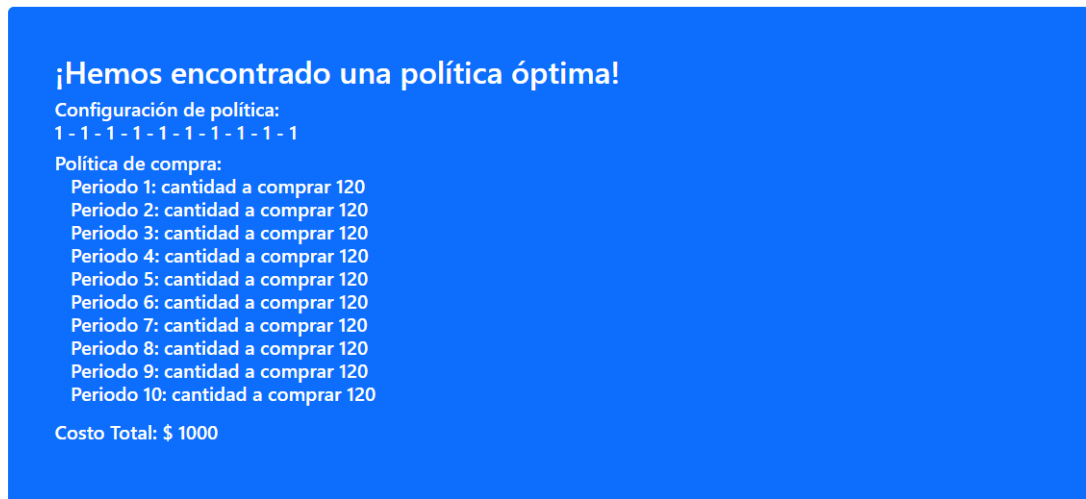
Costo por Pedido  
100

Costo de almacenamiento por unidad  
1

Consultar

Figura 5.17: Pantalla de la plataforma digital. Descripción de los valores del costo de pedir y costos de almacenar.

4- Por último, la pantalla muestra la política de abastecimiento óptima, donde se describe cómo se realiza cada pedido para satisfacer los periodos en el horizonte de planificación. Además, esta plataforma presenta varias políticas de abastecimiento de material, mostrando los costos restantes más bajos en comparación con la opción óptima.



**¡Hemos encontrado una política óptima!**

Configuración de política:  
1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1

Política de compra:

- Periodo 1: cantidad a comprar 120
- Periodo 2: cantidad a comprar 120
- Periodo 3: cantidad a comprar 120
- Periodo 4: cantidad a comprar 120
- Periodo 5: cantidad a comprar 120
- Periodo 6: cantidad a comprar 120
- Periodo 7: cantidad a comprar 120
- Periodo 8: cantidad a comprar 120
- Periodo 9: cantidad a comprar 120
- Periodo 10: cantidad a comprar 120

Costo Total: \$ 1000

Figura 5.18: Pantalla de la plataforma digital. Descripción de la política óptima de abastecimiento.

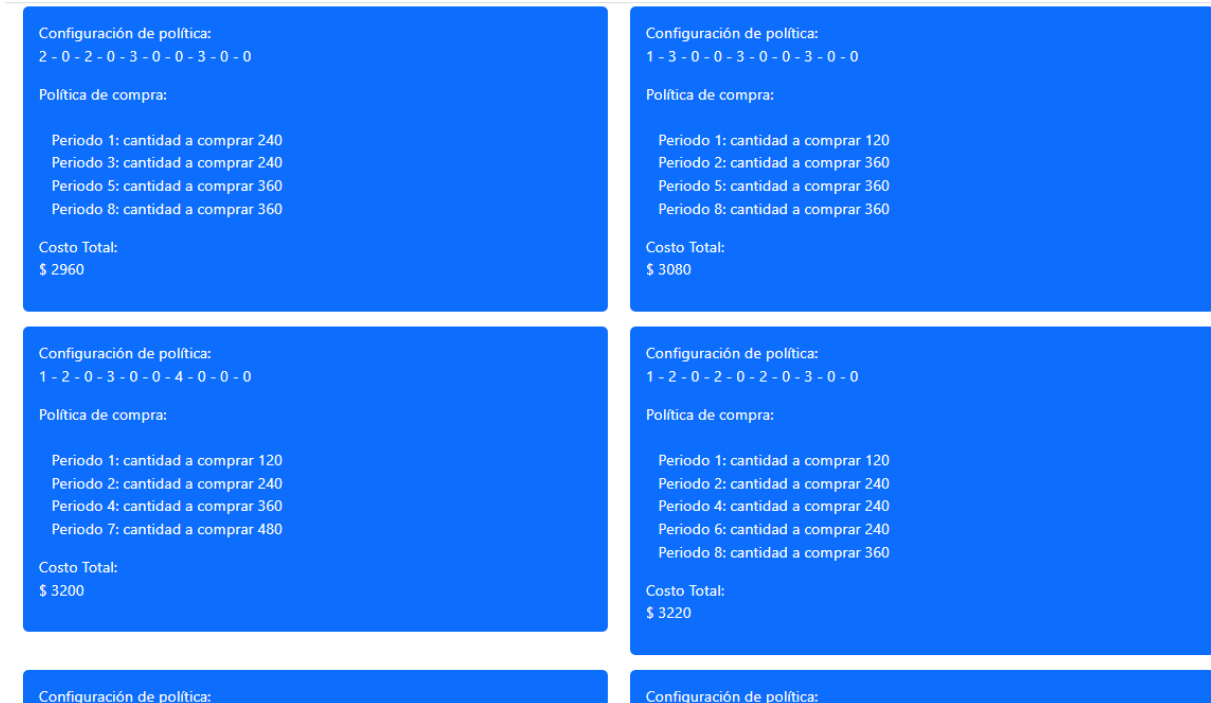


Figura 5.19: Pantalla de la plataforma digital. Descripción de las políticas de abastecimiento restantes con menores costos.

En resumen, esta plataforma ofrece de manera sencilla una respuesta inmediata acerca de la política óptima de compras, además de presentar otras políticas de compras óptimas restantes en comparación con la opción principal. Esto proporciona una herramienta eficiente para tomar decisiones informadas y maximizar los resultados en términos de compras.

## **Capítulo VI**

# **CONCLUSIONES**

## 6.1. Conclusiones generales

Las conclusiones generales siguientes se derivan de la investigación sintetizada en esta Tesis Doctoral:

- Tras analizar el estado del arte y la práctica, se ha evidenciado la necesidad de llevar a cabo investigaciones científicas que promuevan la vinculación y fortalecimiento de las PyMEs. Estos procesos de vinculación son esenciales para crear y mejorar a las pequeñas y medianas empresas, permitiendo determinar cuándo, cómo y cuánto material o insumos se deben adquirir con el objetivo de minimizar los costos, reducir desperdicios y evitar tiempos muertos en las industrias regionales de Mendoza. En este sentido, es crucial explorar todas las posibles combinaciones para agrupar los pedidos de materiales, lo que abrirá nuevas estrategias de organización industrial. Aunque se han reportado experiencias exitosas de vinculación en beneficio de las PyMEs, resulta imperativo incorporar tecnologías digitales para impulsar el crecimiento económico en este ámbito.

- La relevancia del problema científico formulado ha quedado demostrada tanto desde un punto de vista científico como práctico. Se ha constatado la falta de una herramienta metodológica adecuada y adaptable que considere el exhaustivo recuento de todas las opciones de pedido en el problema del tamaño de lote. Además, ninguna de las investigaciones empíricas y teóricas hasta ahora ha abordado de manera específica las relaciones entre el tamaño de los grupos de pedidos y los costos totales, lo cual dificulta la toma de decisiones y el fortalecimiento de las PyMEs. Esta carencia resaltó la necesidad de desarrollar una metodología que aborde de manera integral estos aspectos, proporcionando una herramienta eficaz y flexible para optimizar el tamaño de lote y facilitar la toma de decisiones en el contexto de las pequeñas y medianas empresas.

- Cuando los requerimientos son constantes en el horizonte, un análisis detallado del

escenario específico del dimensionamiento del lote y la determinación de variables relevantes, permitió obtener una ecuación matemática para calcular los costos totales; esta ecuación es aplicable a todas las combinaciones posibles de adquisición de materiales. Además, la implementación de este modelo ha demostrado reducir significativamente el tiempo necesario para el procesamiento de datos en el problema de dimensionamiento de lotes en la Planificación de Requerimientos de Materiales. Al utilizar estos criterios, las PyMEs serán capaces de tomar decisiones rápidas y eficientes en este contexto.

- Cuando los requerimientos son variables en el horizonte, es posible inferir un patrón característico en la forma de agrupar los órdenes que permite decidir qué caso utilizar y cuál no tener en cuenta, pudiendo así reducir el número de combinaciones a analizar. Se torna relevante al pensar que las empresas podrían adoptar las políticas descritas en este trabajo como líneas estratégicas para optimizar sus compras. Por lo tanto, al centrarse el estudio en los agrupamientos más probables, se puede reducir significativamente el tiempo de procesamiento en la planificación de necesidades de materiales; esto permite agilizar el proceso y enfocarse en las combinaciones más relevantes.

- Se estableció un modelo de optimización en el dimensionamiento de lotes de materiales a través de un sistema elástico. La principal contribución de este estudio fue resolver el problema del tamaño del lote a través de una sola ecuación, sin la necesidad de usar algoritmos y realizar cálculos complejos.

- Se concluyó que el problema del suministro de materiales es isomorfo con un sistema mecánico unidimensional simple de partículas puntuales conectadas por elementos elásticos. El modelo se utilizó para resolver un caso real, los resultados se compararon con algoritmos clásicos aceptados. Se observa que el modelo obtuvo la solución óptima en un menor tiempo de ejecución.

- Se logró la creación de una plataforma digital que brinda una respuesta instantánea y rápida acerca de la política de compras óptimas. Además de mostrar otras políticas de compras óptimas, se obtuvo otras alternativas en comparación con la opción principal. De esta forma, se ofrece una solución sencilla y accesible para determinar la mejor estrategia de compras, permitiendo evaluar diferentes opciones y sus resultados de manera comparativa.

## 6.2. Recomendaciones

Es comprensible que el modelo propuesto para determinar las políticas de abastecimiento en PyMEs tenga limitaciones. Las limitaciones mencionadas se centran en las áreas de investigación, la validación en diferentes industrias y regiones, la colaboración con diversos sectores y la divulgación de resultados. A continuación, se describen con más detalle:

- Áreas de investigación: La investigación puede profundizar en el modelo base utilizado para determinar si los costos asociados al abastecimiento de materiales tienen comportamientos particulares según la industria o el sector. Es importante entender si ciertos rubros tienen características que requieren un enfoque diferenciado en términos de abastecimiento y logística. Esto podría mejorar la precisión y aplicabilidad del modelo en diferentes contextos industriales. Por otra parte, la exposición de las combinaciones en la matriz, esencial para la exploración de soluciones, se ve restringida debido a la complejidad que implica estudiar y procesar horizontes de planificación mayores a 30 en algunos software.

- Validación en diferentes industrias y regiones: Si bien el modelo puede ser válido en el contexto actual, es necesario verificar su eficacia en una mayor variedad de industrias y regiones, tanto locales como en áreas cercanas. Las diferencias en las cadenas de suministro, los proveedores y las dinámicas de mercado podrían afectar la aplicación del modelo en diferentes contextos, por lo que es esencial confirmar su utilidad en una variedad de situaciones.

- Colaboración con sectores gubernamentales y académicos: Proponer la herramienta a los sectores gubernamentales a nivel provincial y municipal, así como a universidades y otras organizaciones académicas, podría proporcionar oportunidades para aplicar el modelo en situaciones prácticas. Esto permitiría una retroalimentación valiosa y la adaptación del modelo a problemas y condiciones del mundo real, además de fomentar la colaboración interdisciplinaria.

- Divulgación y consolidación: La divulgación continua de los resultados de la investigación a través de artículos científicos, presentaciones en congresos y cursos de formación es crucial para establecer la credibilidad y utilidad del modelo. La consolidación teórico-práctica es esencial para que la herramienta sea ampliamente aceptada y utilizada en diversos territorios del país. Las adaptaciones necesarias para diferentes contextos deben ser consideradas y comunicadas adecuadamente.

En resumen, es importante abordar estas limitaciones propuestas para mejorar la aplicabilidad y la eficacia del modelo de políticas de abastecimiento en PyMEs. Al hacerlo, se puede lograr una herramienta más robusta y adaptable que beneficie a una variedad de industrias y regiones, y que contribuya al avance en la gestión del abastecimiento en el ámbito empresarial y académico.

### **6.3. Líneas de Investigación Futuras**

En el contexto de este estudio, la investigación se ha focalizado en cuestiones particulares. No obstante, se han dejado pendientes para futuras investigaciones una serie de aspectos que se detallan a continuación:

- Basándonos en el modelo planteado en esta tesis, integrar variables adicionales, tales como el volumen de compra y la degradación temporal de los artículos.
- Adicionalmente, desarrollar un modelo analítico para sistemas heterogéneos.

- La investigación podría ahondar en el modelo base al estudiar los costos relacionados con el abastecimiento de materiales, ya que estos muestran un comportamiento particular dependiendo de la industria o el sector.

## Referencias

- [1] Abarca, K. (2015). Crecimiento, desarrollo económico y desarrollo humano: significados diferentes, fines complementarios. *América Económica*. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com/analisis-opinion/crecimiento-desarrollo-economicoy-desarrollo-humano-significados-diferentes-fines>.
- [2] Alfares, H. K., y Turnadi, R. (2018). Lot sizing and supplier selection with multiple items, multiple periods, quantity discounts, and backordering. *Computers and Industrial Engineering*, 116, 59–71.
- [3] Anderson, C. (2014). The long tail. wired 2004. October.[Google Scholar].
- [4] Baciarello, L., D'Avino, M., Onori, R., y Schiraldi, M. M. (2013). Lot sizing heuristics performance. *International Journal of Engineering Business Management*, 5, 5.
- [5] Bahroun, M., Harbi, S., y Bouchriha, H. (2019). A new approach for ordering decision under uncertainties: a case study in the retail supply chain. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 32(3-4), 392–413.
- [6] Baker, K. R. (1993). Requirements planning. *Handbooks in operations research and management science*, 4, 571–627.
- [7] Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson educación.
- [8] Banco de Desarrollo, d. A. L. (2013). *Hacia la transformación digital de américa latina: las infraestructuras y los servicios TIC en la región*. corporación andina de fomento.
- [9] Bartholdi III, J. J., y Hackman, S. T. (2008). Allocating space in a forward pick area of a distribution center for small parts. *IIE Transactions*, 40(11), 1046–1053.
- [10] Beck, T., Demirguc-Kunt, A., y Levine, R. (2005). Smes, growth, and poverty: Cross-

- country evidence. *Journal of economic growth*, 10, 199–229.
- [11] Benjamin, R. I., y Blunt, J. (1992). Critical it issues: The next ten years. *MIT Sloan Management Review*, 33(4), 7.
- [12] Berenguer, J., y Ramos, J. (2003). *Negocios digitales: competir utilizando tecnologías de información*. Navarra, España: Universidad de Navarra (EDUNSA).
- [13] Betancourt, D. (2021). *Planeación de la producción*. Descargado de <https://www.ingenioempresa.com/planeacion-de-la-produccion/>.
- [14] Betancourt, F., D. (2016). Cómo hacer un plan maestro de producción (MPS). *Ingenio Empresa*, 27.
- [15] Billington, P. J., McClain, J. O., y Thomas, L. J. (1983). Mathematical programming approaches to capacity-constrained mrp systems: review, formulation and problem reduction. *Management Science*, 29(10), 1126–1141.
- [16] Bitran, G. R., y Matsuo, H. (1986). The multi-item capacitated lot size problem: Error bounds of manne's formulations. *Management Science*, 32(3), 350–359.
- [17] Bogataj, D., y Bogataj, M. (2019). Npv approach to material requirements planning theory—a 50-year review of these research achievements. *International journal of production research*, 57(15-16), 5137–5153.
- [18] Boiteux, O. D., Forradellas, R., Palma, R., y Guiñazu, H. (2010). Modelo matemático para la planificación agregada de la producción de IMPSA. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 2(4), 90–112.
- [19] Buckingham, D. (2005). *Educación en medios*. Barcelona: Paidós.
- [20] Cámara Núñez, M. C. (2010). *Análisis de los sistemas business intelligence y su aplicación práctica en los proyectos de software* (B.S. Thesis).

- [21] Camizán Lozano, J. L. (2017). *Factores en la fase de post-implementación que influyen en los logros de los beneficios esperados en sistemas ERP* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática.
- [22] Casalet, M., y Stezano, F. (2021). The progress of digitalisation in Mexico: effects on the institutional structure. *International Journal of Business Innovation and Research*, 24(3), 339–363.
- [23] CEPAL. (2012). *Perspectivas económicas de América Latina 2013: políticas de pymes para el cambio estructural*. OCDE.
- [24] CEPAL. (2013). Economía digital para el cambio estructural y la igualdad.
- [25] CEPAL, N. (2021). Tecnologías digitales para un nuevo futuro.
- [26] Cetic.br. (2019). TIC empresas 2019. pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nas empresas brasileiras.
- [27] Chen, Z., y Rossi, R. (2019). A cash constrained single item stochastic lot-sizing problem. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1479–1483.
- [28] Delfín, F. (2014). La capacitación como potencializador de las pymes. *Gestión y Control en contaduría*, 45–52.
- [29] Diaby, M., Bahl, H. C., Karwan, M. H., y Zionts, S. (1992). A Lagrangean relaxation approach for very-large-scale capacitated lot-sizing. *Management Science*, 38(9), 1329–1340.
- [30] Dini, M., Gligo, N., y Patiño, A. (2021). Transformación digital de las mipymes: elementos para el diseño de políticas: [repositorio.cepal.org](https://repositorio.cepal.org).
- [31] Drucker, P. (2013). *Las pymes en Argentina - Bolsa de Comercio de Córdoba*. Descargado de <https://bolsacba.com.ar/buscador/?p=1955>

- [32] Enríquez Pérez, I. (2016). Las teorías del crecimiento económico: notas críticas para incursionar en un debate inconcluso. *Revista latinoamericana de desarrollo económico*.(25), 73–125.
- [33] Erlenkotter, D. (1990). Ford Whitman Harris and the economic order quantity model. *Operations Research*, 38(6), 937–946.
- [34] Farahani, R. Z., Asgari, N., y Davarzani, H. (2009). *Supply chain and logistics in national, international and governmental environment: concepts and models*. Springer Science and Business Media.
- [35] Galve, F., Javier, G. M., Juan, C. S. C., Ángel, V. I., y Ángel, J. (1993). *Algorítmica: diseño y análisis de algoritmos funcionales e imperativos*.
- [36] Guimarães, E. R. S., de Assis Rangel, J. J., Vianna, D. S., Shimoda, E., y Skury, A. L. D. (2015). Análise de desempenho de modelos simulação a eventos discretos com otimização. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 7(13), 18–43.
- [37] Haag, S., Cummings, M., y Dawkins, J. (1998). Management information systems. *Multimedia systems*, 279, 280–297.
- [38] Heizer, J. H., y Render, B. (2004). *Principles of operations management*. Pearson Educación.
- [39] Hoffa, P., y Pawlewski, P. (2014). Models of organizing transport tasks including possible disturbances and impact of them on the sustainability of the supply chain. *Process Simulation and Optimization in Sustainable Logistics and Manufacturing*, 141–151.
- [40] Holmström, J., y Romme, A. G. L. (2012). Guest editorial: Five steps towards exploring the future of operations management. *Operations Management Research*, 5, 37–42.

- [41] Hoseini Shekarabi, S. A., Gharaei, A., y Karimi, M. (2019). Modelling and optimal lot-sizing of integrated multi-level multi-wholesaler supply chains under the shortage and limited warehouse space: Generalised outer approximation. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 6(3), 237–257.
- [42] Iñigo, C., Gerrikagoitia, J., y Aurkene, A. (2013). *Estudio comparativo de las herramientas de business intelligence: Empoderando el criterio de selección a las pymes*. ResearchGate.
- [43] Inza, A. U. (2006). *Manual básico de logística integral*. Ediciones Diaz de santos.
- [44] Jaimurzina, A., Pérez, G., y Sánchez, R. (2015). Políticas de logística y movilidad para el desarrollo sostenible y la integración regional: repositorio.cepal.org.
- [45] Jeenanunta, C., Kongtarat, V., y Buddhakulsomsiri, J. (2021). A simulation-optimisation approach to determine optimal order-up-to level for inventory system with long lead time. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 38(2), 253–276.
- [46] Jeunet, J., y Jonard, N. (2000). Measuring the performance of lot-sizing techniques in uncertain environments. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 197–208.
- [47] Kaever, A., Landesfeind, M., Feussner, K., Feussner, I., y Meinicke, P. (2013). Metabolite clustering and visualization of mass spectrometry data using one-dimensional self-organizing maps. *The Handbook of Plant Metabolomics*, 273–287.
- [48] Kane, G. C., Palmer, D., Phillips, A. N., Kiron, D., y Buckley, N. (2015). Strategy, not technology, drives digital transformation. *MIT Sloan Management Review*.
- [49] Karimi, B., Ghomi, S. F., y Wilson, J. (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, 31(5), 365–378.
- [50] Kaufman, L., y Rousseeuw, P. J. (2009). *Finding groups in data: an introduction to*

*cluster analysis*. John Wiley and Sons.

- [51] Majstorovic, V., Stojadinovic, S., Lalic, B., y Marjanovic, U. (2020). ERP in industry 4.0 context. En *Advances in production management systems. the path to digital transformation and innovation of production management systems: Ifip wg 5.7 international conference, apms 2020, novi sad, serbia, august 30–september 3, 2020, proceedings, part i* (pp. 287–294).
- [52] Mamani, Y. (2018). Business intelligence: herramientas para la toma de decisiones en procesos de negocio. *Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac*.
- [53] Manríquez, M. R., Rodríguez, J. T., Olalde, O. C., y Gallardo, A. A. A. (2009). Nivel de integración de las tics en las Mipymes, un análisis cualitativo. *Revista Raites*, 3(6), 157–179.
- [54] Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., y Melnyk, S. A. (2019). Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. *International Journal of Production Research*, 57(1), 166–181.
- [55] Ministerio de Economía, T. (2021). *Total de pymes por provincias. Sectores y distritos principales*. Descargado de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/economia-y-trabajo-lanzaron-el-mapa-productivo-laboral-argentino>.
- [56] Ministerio de Producción, T. (2019). *Nuevas categorías para ser PyME*. Descargado de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/nuevas-categorias-para-ser-pyme-3>.
- [57] Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., y Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing and industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of manufacturing systems*, 49, 194–214.

- [58] Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., y Wuest, T. (2019). Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(5), 1342–1361.
- [59] Mittelman, H. (2007). Recent benchmarks of optimization software. En *22nd European Conference on Operational Research*.
- [60] Mossberger, K., Tolbert, C. J., y McNeal, R. S. (2008). Excerpts from digital citizenship: The internet, society, and participation (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2007). *First Monday*.
- [61] Motta, J. J., Morero, H., y Ascúa, R. (2019). Industria 4.0 en mipymes manufactureras de la argentina.
- [62] Nascimento, M. C., Resende, M. G., y Toledo, F. M. (2010). Grasp heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 747–754.
- [63] Nikolić, N., Nikolić, D., Marinkovic, S., y Mihajlovic, I. (2021). Application of fahp-promethee hybrid model for prioritizing SMEs failure factors. *Engineering Management Journal*, 33(3), 202–219.
- [64] Noori, H., y Radford, R. (2000). Administración de operaciones y producción: Calidad total y respuesta sensible rápida. *Editorial Mc Graw Hill*.
- [65] OECD. (2002). *Reviewing the ICT sector definition: Issues for discussion*. Working Party on Indicators for the Information Society Stockholm.
- [66] Ortiz, C. H., y Uribe, J. I. (2012). *Crecimiento económico, industrialización y empleo: Una visión heterodoxa sobre el desarrollo de Colombia y el Valle del Cauca*. Universidad del Valle.

- [67] Ortiz, L. E. M., Sánchez, L. M. C., Ferrer, N. J. L., y Cartay, R. (2020). Desarrollo y crecimiento económico: Análisis teórico desde un enfoque cuantitativo. *Revista de Ciencias Sociales*, 26(1), 233–253.
- [68] Oteyza, E. d. O., Osnaya, E. L., Garciadiego, C. H., y Hoyo, A. M. C. (2001). *Geometría analítica y trigonometría*. Pearson Educación.
- [69] Pawlewski, P., y Greenwood, A. (2014). *Process simulation and optimization in sustainable logistics and manufacturing*. Springer.
- [70] Pinto, C. A. S., Reis, A. D. C., y Braga, M. (2020). The supply chain as part of knowledge management in organisational environments. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 36(3), 385–398.
- [71] Porter, M. (1985). Ventaja competitiva: crear y sostener un desempeño superior. *Grupo Editorial Patria*.
- [72] Porter, M. (2008). Las cinco fuerzas competitivas que le dan forma a la estrategia. *Harvard Business Review*, 86(1), 58–77.
- [73] Porter, M. E., y Millar, V. E. (1985). *How information gives you competitive advantage*. Harvard Business Review Reprint Service.
- [74] PyME, F. O. (2016). Informe especial: Inserción internacional y competencia local en el segmento de las PyME manufactureras. *Fundación Observatorio PyME*.
- [75] Randa, A. C., Dođru, M. K., Iyigun, C., y Özen, U. (2019). Heuristic methods for the capacitated stochastic lot-sizing problem under the static-dynamic uncertainty strategy. *Computers and Operations Research*, 109, 89–101.
- [76] Russell, S. J., y Norvig, P. (2004). *Inteligencia artificial: un enfoque moderno* (n.ºs 04; Q335, R8y 2004.).
- [77] Sampieri Hernández, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las*

*rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill México.

- [78] Samuelson, P. A., y Solow, R. M. (1956). A complete capital model involving heterogeneous capital goods. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(4), 537–562.
- [79] Sanchez-Varretti, F. O., Bulnes, F. M., y Ramirez-Pastor, A. J. (2019). Cluster-exact approximation applied to adsorption with non-additive lateral interactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 518, 145–157.
- [80] Satuffer, D., y Aharony, A. (2014). *Introduction to percolation theory: revised second edition*. CRC press.
- [81] Schenker, S. (2020). *Lot sizing*. Descargado 2023-01-30, de <https://genlots.com/lot-sizing-in-industrial-purchasing/>
- [82] Sciortino, F., Tartaglia, P., y Zaccarelli, E. (2005). One-dimensional cluster growth and branching gels in colloidal systems with short-range depletion attraction and screened electrostatic repulsion. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(46), 21942–21953.
- [83] Senasa. (2022). *Continúa la certificación de ciruelas desecadas para exportación en mendoza*. Descargado de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/continua-la-certificacion-de-ciruelas-desecadas-para-exportacion-en-mendoza>.
- [84] Shapiro, J. F. (1993). Mathematical programming models and methods for production planning and scheduling. *Handbooks in operations research and management science*, 4, 371–443.
- [85] Shinano, Y., Berthold, T., y Heinz, S. (2018). Paraxpress: an experimental extension of the fco xpress-optimizer to solve hard MIPs on supercomputers. *Optimization*

*Methods and Software*, 33(3), 530–539.

- [86] Silver, E. A., y Meal, H. C. (1969). A simple modification of the EOQ for the case of a varying demand rate. *Production and inventory management*, 10(4), 52–65.
- [87] Sipper, D., Bulfin, R. L., González Osuna, M., y Hernández García, S. (1998). *Production: planning, control, and integration*. McGraw-Hill.
- [88] Sollish, F., y Semanik, J. (2007). *The procurement and supply manager's desk reference*. John Wiley and Sons.
- [89] Stadler, C. (2002). Success guide for e-procurement. *Info-Tech Research Group (ITRG), Ontario*.
- [90] Subsecretaria, d. P. d. M. (2020). *MENDOZA INFORME PRODUCTIVO PROVINCIAL*. Descargado 2023-01-30, de [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/34\\_2019\\_mendoza.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/34_2019_mendoza.pdf)
- [91] Tai, P., Huyen, P., y Buddhakulsomsiri, J. (2021). A novel modeling approach for a capacitated (s, t) inventory system with backlog under stochastic discrete demand and lead time. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 12(1), 1–14.
- [92] Tambunan, T. (2008). Development of SME in ASEAN with reference to indonesia and thailand. *Southeast Asian Journal of Economics*, 53–83.
- [93] Tempelmeier, H. (2002). A simple heuristic for dynamic order sizing and supplier selection with time-varying data. *Production and Operations Management*, 11(4), 499–515.
- [94] Thizy, J., y Van Wassenhove, L. N. (1985). Lagrangean relaxation for the multi-item capacitated lot-sizing problem: A heuristic implementation. *IIE transactions*, 17(4), 308–313.

- [95] Thomas, L. J., y McClain, J. (1993). *An overview of production planning. volume 4 of handbooks in or and ms: Logistics of production and inventory, chapter 7*. North Holland.
- [96] Thompson, C., Holter, J., Hayes, H., Silver, H., y Urban Jr, W. (1973). Nutrition of white-tailed deer. i. energy requirements of fawns. *The Journal of Wildlife Management*, 301–311.
- [97] Tobares, T. D., Mieras, M. M., Palma, R. R., y Sanchez-Varretti, F. O. (2021). Theoretical relationship between the cluster size of orders in the materials requirement planning. *Int. J. Logistics Systems and Management. inpress*.
- [98] Tobares, T. D., Narambuena, C. F., y Sanchez Varretti, F. O. (2017). Análisis de agrupamientos de pedidos mediante enumeración exhaustiva en la MRP. En *VI simposio argentino de informática industrial (SII)-JAIIO 46 (Córdoba, 2017)*.
- [99] Torrisi, S. (1998). *Industrial organisation and innovation: an international study of the software industry*. Edward Elgar Publishing.
- [100] Trigeiro, W. W. (1989). A simple heuristic for lot sizing with setup times. *Decision Sciences*, 20(2), 294–303.
- [101] Viale. (1996). *Basics of inventory management from warehouse to distribution center*. Crisp Learning.
- [102] Wagner, H. M., y Whitin, T. M. (1958). Dynamic version of the economic lot size model. *Management science*, 5(1), 89–96.
- [103] Ward, A., Screen, C., y Khan, H. (2017). *Oracle business intelligence enterprise edition 12c*. Packt Publishing Ltd.
- [104] Warner, K. S., y Wäger, M. (2019). Building dynamic capabilities for digital transformation: An ongoing process of strategic renewal. *Long range planning*, 52(3),

326–349.

- [105] Wilmsmeier, G., Roser, G., Alderman, M., y Ilina, E. (2014). La eficiencia: un ingrediente clave para las cadenas logísticas sostenibles.
- [106] Wiśniewski, T., y Szymański, R. (2021). Simulation-based optimisation of replenishment policy in supply chains. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 38(2), 135–150.
- [107] Woarawichai, C., y Naenna, T. (2018). Solving inventory lot-sizing with supplier selection under alternative quantity discounts and vehicle capacity. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 30(2), 179–194.
- [108] Yin, X. F., Khoo, L. P., y Chong, Y. T. (2013). A fuzzy c-means based hybrid evolutionary approach to the clustering of supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 66(4), 768–780.
- [109] Zhang, X., Lv, L., Ji, L., Guo, G., Liu, L., Han, D., ... Yang, D. (2016). Self-assembly of one-dimensional nanocrystal superlattice chains mediated by molecular clusters. *Journal of the American Chemical Society*, 138(10), 3290–3293.

# **ANEXOS**

# Apéndice A

## Clasificación de las PyMEs

A través de la Resolución 220/2019 la Secretaría de Emprendedores y PyMEs del Ministerio de Producción en el año 2019 la clasificación para determinar qué empresas se encuadran dentro de la categoría PyMEs, con base a los límites de facturación anual es la siguiente:

Categoría	Actividad				
	Construcción	Servicios	Comercio	Industria y Minería	Agropecuaria
<b>Micro</b>	\$ 5.900.000	\$ 4.600.000	\$ 15.800.000	\$ 13.400.000	\$ 3.800.000
<b>Pequeña</b>	\$ 37.700.000	\$ 27.600.000	\$ 95.000.000	\$ 81.400.000	\$ 23.900.000
<b>Mediana tramo 1</b>	\$ 301.900.000	\$ 230.300.000	\$ 798.200.000	\$ 661.200.000	\$182.400.000
<b>Mediana tramo 2</b>	\$ 452.800.000	\$ 328.900.000	\$ 1.140.300.000	\$ 966.300.000	\$ 289.300.000

Cuadro 7.1: Clasificación de las PyMEs. Fuente: elaboración propia con datos extraídos de la Secretaría de Emprendedores y PyMEs del Ministerio de Producción (Ministerio de Producción, 2019).

# Apéndice B

## Código del Algoritmo para el modelo propuesto

```
Program combinacions                                     !
Implicit None                                           !
INTEGER v, z, x, c, repe, fin, r, cuenta, i, j         !
Integer, Parameter :: N=5                               !
Integer, Parameter :: fi=2**(N-1)                       !
Integer, Parameter :: co=N                               !
INTEGER, DIMENSION (fi,co) :: A                        !
Character*(100) arch                                    !
arch="Todas_N_5.dat"                                    !
Open(100,FILE=arch,ACCESS='APPEND')                    !
v=2                                                      !
fin=N                                                    !
Do c=1,N                                                !
Write(*,*) "c: ", c                                    !
cuenta=0                                                !
if (c.eq.1) then                                       !
  Do z=1,fin                                           !
    Do x=1,2**(fin-v)                                  !
      cuenta=cuenta+1                                  !
      Write(*,*) v-1                                  !
      A(cuenta, c)=v-1                                !
    Enddo                                              !
    v=v+1                                              !
  Enddo                                               !
  Write(*,*) fin                                       !
  cuenta = cuenta +1                                  !
  A(cuenta, c)=fin                                     !
  Write(*,*)                                           !
endif                                                  !
if (c.gt.1) then                                       !
  repe=int((2**(c-1))/2)                               !
  Do r=1,repe                                          !
    V=3                                                !
    Do z=1,fin                                         !
      Do x=1,2**(fin-v)                               !
        cuenta = cuenta +1                             !
        Write(*,*) v-2                                 !
        A(cuenta, c)=v-2                             !
      Enddo                                           !
      v=v+1                                           !
    Enddo                                             !
    Write(*,*) "0"                                     !
    cuenta = cuenta + 1                               !
    A(cuenta, c)=0                                     !
  Enddo                                              !
  Write(*,*) "0"                                     !
  cuenta = cuenta + 1                               !
  A(cuenta, c)=0                                     !
Enddo                                               !
Write(*,*) " _____ "                             !
fin=fin-1                                             !
Write(*,*)                                           !
Write(*,*) cuenta                                     !
endif                                               !
Enddo                                               !
Do i=1,fi                                             !
  Do j=1,co                                           !
    Write(*, '(I5)', advance='no') A(i,j)             !
    Write(100, '(I5)', advance='no') A(i,j)           !
  Enddo                                              !
  Write (*,*) ""                                       !
  Write(100, '(A)', advance='yes') ""                 !
Enddo                                               !
Write(*,*) "Fin del programa"                         !
End
```

Figura 8.1: Descripción del código del Algoritmo. Fuente: elaboración propia.

# Apéndice C

## Resto distinto de cero

Si el resto del cociente  $N/Np_j$  es igual a 0, el tamaño de los agrupamientos  $Np_j$  es igual entre sí. Si el resto del cociente  $N/Np_j$  es diferente a 0, la solución es una combinación  $j$  que incluye dos clústeres de diferente tamaño. Esta combinación tiene  $Np_j - rest$  clusters de tamaño  $a_{jk}$  igual al cociente  $N/Np_j$  y tiene un número de clusters igual al resto, cuyo tamaño es  $N/Np_j + 1$ . Veamos el siguiente ejemplo: si  $N = 10$ ,  $Np_j = 3$ .

Consecuentemente,

$$\frac{N}{Np_j} = \frac{10}{3} = 3,33',$$
$$Np_j - rest = 3 - 1 = 2,$$
$$\frac{N}{Np_j} + 1 = 3 + 1 = 4.$$

Por lo tanto, la solución es una combinación que incluye dos agrupamientos de tamaño tres y un agrupamiento de tamaño cuatro.

# Apéndice D

## Evolución de indicadores de producción en Mendoza

Producto	UM	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Part. Total Nac. (%) (*)	Fuente
Ajo	miles de tn	124	148	138	161	94	140	164	98	93	101	111	s.d.	120	76,0	IDR
Ciruela para cons. en fresco	miles de tn	67	36	29	s.d.	16	28	24	33	3	33	23	s.d.	25	s.d.	IDR
Ciruela para industria	miles de tn	156	111	101	203	49	139	51	136	30	130	127	39	151	s.d.	IDR
Durazno para cons. en fresco	miles de tn	92	78	64	s.d.	47	82	81	101	18	88	89	s.d.	86	s.d.	IDR
Durazno para industria	miles de tn	139	158	161	183	122	160	156	166	57	139	162	90	140	s.d.	IDR
Stock caprino	miles de cab.	s.d.	s.d.	1.001	901	698	859	836	776	779	804	755	759	760	16,5	SENASA
Uva para vinificar	miles de tn	19.126	20.378	18.200	14.386	18.200	19.321	14.916	19.960	18.137	16.929	10.279	12.688	17.186	68,3	INV
Mostos	miles de hl	3.530	4.385	3.060	1.831	1.798	3.301	2.493	3.721	2.365	2.586	1.007	1.011	2.277	47,7	INV
Vinos	miles de hl	11.463	11.541	11.024	9.215	12.376	11.696	9.001	11.775	11.539	10.290	6.602	8.666	10.936	75,3	INV
Producción de gas natural	millones de m3	2.095	2.316	2.533	2.404	2.296	2.217	2.357	2.482	2.348	2.463	2.292	1.928	1.722	3,7	Secretaría de Energía
Producción de petróleo crudo	miles de m3	5.350	6.033	6.645	5.484	5.259	4.853	4.610	4.437	4.272	4.498	4.553	4.393	4.225	14,9	Secretaría de Energía
Refinación Petróleo	miles de m3	6.357	6.217	6.078	6.258	5.879	6.027	5.831	6.224	6.029	6.384	6.195	5.720	5.805	21,3	Secretaría de Energía
Ocupación hotelera (**)	miles de pernoctaciones	s.d.	s.d.	1.401	1.346	1.472	1.614	1.579	1.625	1.703	1.685	1.694	1.814	1.842	4,6	INDEC

Figura 10.2: Indicadores de producción en la provincia de Mendoza. Fuente: Subsecretaría de Programación de Microeconomía - Subsecretaría de Política Económica (Subsecretaría, 2020).

# Apéndice E

## Distribución geográfica de la producción de ciruela

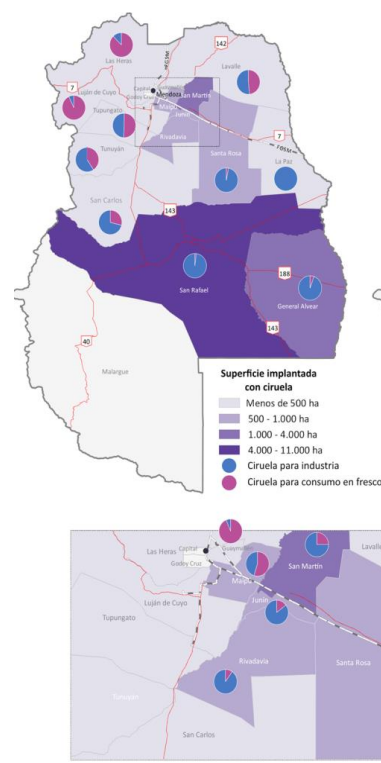


Figura 11.3: Ubicación geográfica de la producción de ciruela en la provincia de Mendoza.  
Fuente: Instituto de Desarrollo Rural (IDR)-Mendoza (Subsecretaria, 2020).