

Escuela de Negocios

Tipo de documento: Tesis de maestría



Master in Management + Analytics

Modelos de “Lot Sizing” para una planta con producción tipo “batch”

Autoría: Moure, Ma. Alejandra

Año: 2024

¿Cómo citar este trabajo?

Moure, M. (2024) “Modelos de “Lot Sizing” para una planta con producción tipo “batch””. [Tesis de maestría. Universidad Torcuato Di Tella]. Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella.

<https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/13747>

El presente documento se encuentra alojado en el **Repositorio Digital de la Universidad Torcuato Di Tella** bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Dirección: <https://repositorio.utdt.edu>



UNIVERSIDAD
TORCUATO DI TELLA

MASTER IN MANAGEMENT + ANALYTICS

*Modelos de “Lot Sizing” para
una planta con producción tipo
“batch”*

TESIS

Ma. Alejandra Moure

Noviembre 2024

Tutor: Javier Marenco

Resumen

El presente trabajo propone incorporar al proceso mensual del departamento de "Supply Chain" la planificación de la producción por producto terminado con el fin de dimensionar volumen de producción y distribución, alocar recursos productivos y logísticos, dimensionar capacidad por planta productiva, gestionar niveles de inventario, y dimensionar abastecimiento de materias primas y pack. Partiendo de una base de datos real provista por la compañía, se realizaron diferentes ejercicios con técnicas de programación lineal entera, y mediante la modelización de problemas de lot sizing, se obtuvieron resultados basados en un modelo de optimización. Para la mejor toma de decisión dentro del ciclo mensual, se proponen diferentes escenarios de demanda, de menor a mayor probabilidad de ocurrencia, y diferentes escenarios productivos con el fin de atender diferentes políticas de inventario y consecuentemente reducir los costos asociados. Los resultados obtenidos del modelo para cada escenario, indicarán el grado de robustez del mismo, y demostrarán la simplificación del proceso de planificación, disminuyendo procesos manuales y tiempos de ejecución para la toma de decisiones.

Abstract

This thesis proposes to incorporate the production planning into the monthly process of the Supply Chain department, with the objective of determine production size and distribution volume, allocate productive and logistic resources, size capacity by production plant, manage inventory levels, and determine the supply of raw materials and packaging. Starting from a dataset provided by the company, different exercises were performed with integer linear programming techniques and through the modeling of lot-sizing problems. Different demand scenarios are proposed, from lowest to highest probability of occurrence, and different productive scenarios in order to meet different inventory policies and consequently reduce associated costs. The results obtained from the model attest to the robustness of the model and shows that the planning process is simplified by reducing manual processes and execution times and allowing a more data driven decision making process.

Índice

Capítulo 1. Introducción	6
1.1. Contexto	6
1.2. Problema y objetivo	12
1.3. Análisis de bibliografía	14
Capítulo 2. Datos	17
Capítulo 3. Metodología	25
Capítulo 4. Resultados	32
4.1 Escenario más probable	32
4.1 Escenario más probable para el Producto 1	38
4.2 Escenario más probable para Producto 2	39
4.2 Análisis de sensibilidad con cambios en la capacidad de producción	40
4.3 Análisis de sensibilidad con cambios en la demanda	43
4.3.1 Escenario más probable	45
4.3.2 Escenario menos favorable	46
4.3.3 Escenario más favorable	49
4.4 Comparativa escenarios de demanda	51
Capítulo 5. Conclusiones	53
Bibliografía	54

Índice de Tablas

Tabla 1: Entradas del Material Requirements Planning	13
Tabla 2: Resultados del análisis estadístico	21
Tabla 3: Capacidad de producción por célula	29
Tabla 4: Resultados escenario más probable	35
Tabla 5: Análisis escenario más probable	36
Tabla 6: Distribución de la producción por célula de fabricación	37
Tabla 7: Resultados producto 1	39
Tabla 8: Resultados análisis de sensibilidad	41
Tabla 9: Calendario de ajustes de precios y costos	42
Tabla 10: Calendario de ajustes de precios y costos YTD-YTG	42
Tabla 11: Resultados escenarios	42
Tabla 12: Indicadores 2024	44
Tabla 13: Escenarios vs 2023	45
Tabla 14: Comparativa Escenario más probable vs años anteriores (trimestre)	46
Tabla 15: Comparativa Escenario poco favorable vs años anteriores (trimestre)	47
Tabla 16: Comparativa Escenario poco favorable vs años anteriores (trimestre)	47
Tabla 17: Resultados escenario menos favorable	48
Tabla 18: Análisis escenario menos favorable	48
Tabla 19: Comparativa Escenario favorable vs años anteriores (trimestre)	50
Tabla 20: Resultados escenario más favorable	50

Índice de Figuras

Figura 1: OTIF	7
Figura 1: Modelo de estrategia de producción	9
Figura 2: Estrategias de producción	10
Figura 3: Flujo la Planificación estratégica	11
Figura 4: Variaciones entre modelos estadísticos	21
Figura 5: Perfil de demanda año a año	22
Figura 6: Ventas históricas + pronóstico	22
Figura 7: Capacidad de producción máxima y mínima vs Demanda	24
Figura 8: Capacidad de Stock Máxima vs Stock máximo de depósito	24
Figura 9: Capacidad agregada por células de producción vs Capacidad por planta	30
Figura 10: Capacidades máximas de producción vs Stock máximo de almacenamiento	30
Figura 11: Tiempos de resolución de SCIP	32
Figura 12: Producción agregada vs Capacidad máxima de producción	33
Figura 13: Producción agregada vs Capacidad máxima vs Demanda	34
Figura 14: Producción agregada vs stock máximo de depósito	35
Figura 15: Producción vs Capacidad máxima por célula	37
Figura 16: Producción vs Stock máximo - Producto 1	38
Figura 17: Stock - incumplimiento - Stock de depósito - Demanda	38
Figura 18: Producción vs Stock máximo - Producto 2	40
Figura 19: Producción vs Stock máximo - Producto 2	40
Figura 20: Perfil de demanda para los tres escenarios	44
Figura 21: Proyección de demanda para los tres escenarios	45
Figura 22: Historia de ventas + Escenario más probable	46
Figura 23: Historia de ventas y escenario poco favorable	47
Figura 24: Stock - incumplimiento - Stock de depósito - Demanda	48
Figura 25: Historia de ventas y escenario más favorable	50
Figura 26: Stock - incumplimiento - Stock de depósito - Demanda	51
Figura 27: Tres escenarios productivos	51
Figura 28: Tres escenarios de stock	52
Figura 29: Tres escenarios de incumplimiento	52

Capítulo 1. Introducción

1.1. Contexto

La gestión de “Supply Chain” se define como el diseño, planificación, ejecución, control y monitoreo de todos los procesos involucrados en la cadena de suministros con el objetivo de reducir costos y crear valor agregado, mediante infraestructuras competitivas, optimizando el flujo logístico y sincronizando abastecimiento y producción para atender el nivel de servicio y consecuentemente la demanda.

Una planificación “End to end” (E2E) propone integrar todos los procesos y funciones de la cadena y trabajar con visibilidad en todas las áreas. Las principales áreas que la componen son: Planeamiento de demanda y abastecimiento, Compras, Producción y manufactura, Logística de entrada y salida, Calidad y desarrollo, y servicio postventa para el atendimento de devoluciones y reclamos. Con el propósito de optimizar la cadena, se suele trabajar con sistemas integrados ERP (Enterprise resource planning) que proveen información en tiempo real y visibilidad punta a punta en la cadena (“E2E”).

Es aquí donde nos preguntamos, ¿son con frecuencia los procesos lo suficientemente robustos para optimizar la cadena?, ¿son óptimos los tiempos de procesamiento y ejecución?, ¿son las decisiones tomadas basadas en soluciones óptimas?. A partir de aquí es donde surge la necesidad de establecer un modelo, utilizando técnicas de programación lineal entera, con el fin de definir un plan de producción a mediano y largo plazo y consecuentemente optimizar niveles de inventario y sus costos asociados.

Los niveles de inventario de la compañía, al representar un costo significativo en la cadena de suministro, son un elemento estratégico para la realización del Profit & Loss y de esa forma reportar sus costos y las ganancias proyectadas a sus partes interesadas. Por este motivo, resulta indispensable su proyección, control y monitoreo de sus niveles y consecuentemente control sobre sus costos. Actualmente, los desafíos que enfrenta la compañía a la hora de proveer los niveles de inventario y atender la demanda, pueden darse por diferentes factores, como por ejemplo producto de una alta volatilidad del mercado y cambios en la demanda, cambios en las preferencias y calidades de productos, así como también limitaciones por restricción de producción, almacenamiento y distribución. Desde una perspectiva del cliente, aquellos productos no disponibles a la hora de ejecutar su compra en la pinturería pueden verse reemplazados por la compra de marcas alternativas. Demoras en las entregas pueden también ser causales de baja de pedidos.

Las implicancias en la falta de stock para poder cumplir las órdenes de los clientes, se puede ver reflejado en el OTIF (On Time In Full) reportado en el año 2023, con valores reportados por debajo del 60% en la alta temporada de ventas. Dichos resultados han sugerido la necesidad de realizar cambios drásticos en la forma de planificar los stocks. Es aquí donde surge la motivación del trabajo que detallaré a continuación.

Figura 1: OTIF



Los niveles de inventario promedio actualmente rondan entre los 20/25 días reportados en el indicador DOH (Days on hand), que representan los días laborales por mes, es decir, entre mes y mes más 25% de la venta proyectada aproximadamente. Para el atendimento de dichos niveles de inventario, la planificación implicará calcular un volumen de producción que atienda las restricciones por capacidad por equipo productivo y que de esa forma proyecte el stock de cierre promedio. El cálculo de las horas hombre o turnos de producción variaría de acuerdo a dicha planificación, y su resultado se traducirá en ocupación de la capacidad planificada.

Resulta importante remarcar que, por la cantidad de productos del portafolio, la producción mensual tendrá que contemplar niveles de stock por producto que optimicen su producción, es decir, los stocks máximos de almacenamiento variarán significativamente para los productos de alta rotación y los de menor rotación. El *tradeoff* que propone un sistema Make to stock es que a mayor nivel de stock mayor será el costo de inventario, costo inmovilizado, pero menor será el costo de producción.

En el presente trabajo se desarrolla y modeliza el problema de lot-sizing ajustado a una industria con producción de tipo “In-house” para una planta con producción de tipo “batch” considerando las restricciones que la componen. El objetivo parte de analizar modelos alternativos al modelo de “The capacitated lot sizing problem” (CLSP), buscando una forma eficiente y escalable para abordar la toma de decisión. Para ello, se utilizan solvers de programación lineal para obtener soluciones óptimas o, en su defecto, soluciones aceptables en la práctica. Es por este motivo, que se incorporarán todas las restricciones actuales con el objetivo de balancear la precisión en el modelado y ajustarse a los tiempos de resolución.

Los modelos de programación lineal entera (ILP) son modelos de programación matemática que involucran la optimización de variables de decisión enteras o binarias bajo restricciones lineales, que especifican cuáles combinaciones de variables son válidas o factibles. En este tipo de modelos se optimiza una función que también debe ser lineal en las variables de decisión.

La organización en la que esta propuesta se basa es una compañía industrial del rubro químico, que comercializa productos terminados y que atiende diferentes mercados tanto nacionales como internacionales y dentro de ellos atiende diferentes segmentos. Es por este motivo que en su estructura cuenta con diferentes unidades de negocio, entre ellos se encuentran los de pintura decorativa, pintura de recubrimiento para la industria naviera y automotriz, y pintura para recubrimiento de electrodomésticos y maquinaria, entre otros.

El presente trabajo se desarrolla en el negocio de pinturas decorativas, cuya producción está conformada por dos plantas diferenciadas, una cuya producción es de Látex, o base acuosa, y la segunda de Sintéticos, o base solvente. Ambas plantas de fabricación tienen una producción

de tipo “Batch” y un número limitado de envasadoras que entregan diferentes capacidades de producto terminado. El modelo que se desarrolla será aplicado a la planta de tipo Látex. Asimismo, el modelo también puede replicarse, considerando diferentes restricciones, a otras plantas de producción.

El portafolio de productos que son fabricados en dicha planta puede diferenciarse por su tecnología y aplicación. Los principales grupos son:

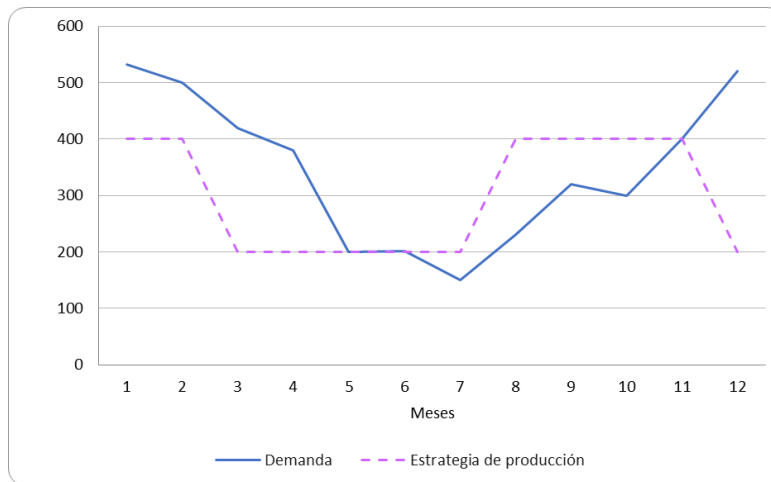
- Productos Látex blancos
- Productos Látex bases tinting
- Productos Látex colores
- Enduídos

Estos cuatro grandes grupos tienen asignadas células de producción con tanques dedicados para atender sus requerimientos de fabricación y envasado. Dichas células serán posteriormente denominadas por las letras A (Látex blancos), B (Látex bases tinting), C (Látex colores) y D (enduídos). Cada célula es operada por diferentes trabajadores especializados, y consecuentemente tiene una capacidad productiva asociada.

A grandes rasgos, se trata de una compañía que cuenta con un departamento de Planificación, cuyas funciones principales son las de establecer las políticas de inventario de producto terminado, dimensionar recursos y capacidad productiva, planificar y programar la producción, materias primas y pack, atendiendo a minimizar los costos y considerando los márgenes presupuestados. Dicho proceso, está configurado para establecer las estrategias de corto, mediano y largo plazo, siendo revisadas y aprobadas mensualmente por los diferentes departamentos en el ciclo de “Integrated Business Planning” (IBP).

De acuerdo a *Apics* (Association for Supply Chain Management, 2019), existen cuatro tipos de estrategia de producción: “Chase”, “Level”, “Subcontracting” y “Hybrid”. La elegida por la compañía es la metodología “Hybrid” que combina las tres estrategias anteriores para alcanzar soluciones que minimizan costos y alcanzar otros objetivos. En virtud de ello, la producción se configura a un nivel determinado durante la alta temporada, y a un segundo nivel más bajo en la baja temporada, es decir, se combinan las estrategias “Chase” y “Level”. La estrategia Chase intenta igualar la producción al nivel de demanda, y de esta forma minimiza los stocks pero incrementa los costos de producción asociados, mientras que la estrategia “Level” establece un nivel fijo, que minimiza los costos, pero sin embargo sube el inventario y por lo tanto sus costos asociados. La baja temporada es atendida con sólo dos turnos, mientras que en la alta temporada se contratan operarios adicionales para atender el tercer turno, es aquí donde la estrategia “Subcontracting” entra en juego. En la Figura 1, a continuación, puede observarse la curva asociada a los dos niveles productivos para la estrategia Hybrid.

Figura 2: Modelo de estrategia de producción

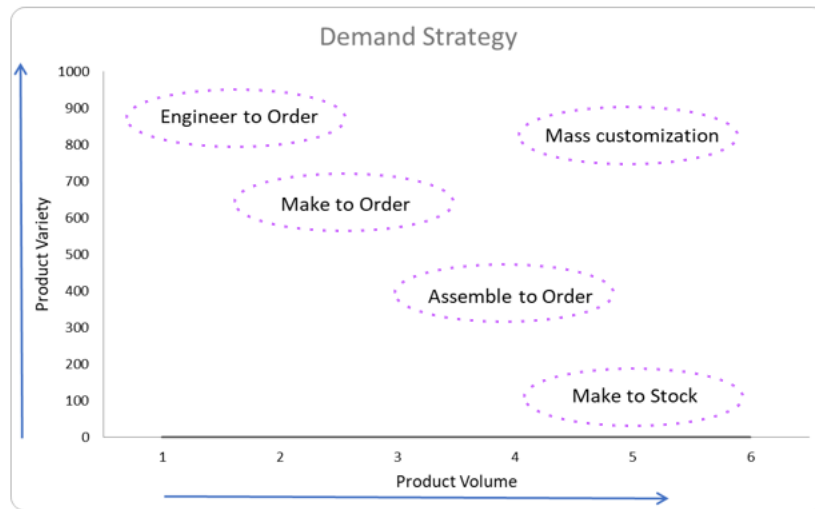


(Association for Supply Chain Management, 2019)

El escenario o estrategia de producción para cada producto va a depender principalmente de tres variables: volumen de venta, cantidad de productos o variedad, y tiempo estimado de fabricación (Association for Supply Chain Management, 2019). Afortunadamente, la industria en cuestión contiene un portfolio medio de productos, por su variabilidad en aplicaciones y diferentes capacidades (1 litro, 4 litros, etc), y adicionalmente un volumen alto de venta que permite fabricar a gran escala. Consecuentemente, dados los tiempos de producción, se lleva a cabo una estrategia de inventario llamada “Make to Stock” (MTS). Productos parametrizados para ser MTS, son productos que se fabrican para reposición de inventario, es decir, que se libera la orden de producción sin tener una orden de compra del cliente que lo demande. La señal para liberar la orden de producción será dada por el nivel de stock, o punto de reposición. Este escenario se aplica al 98% de los productos de la organización.

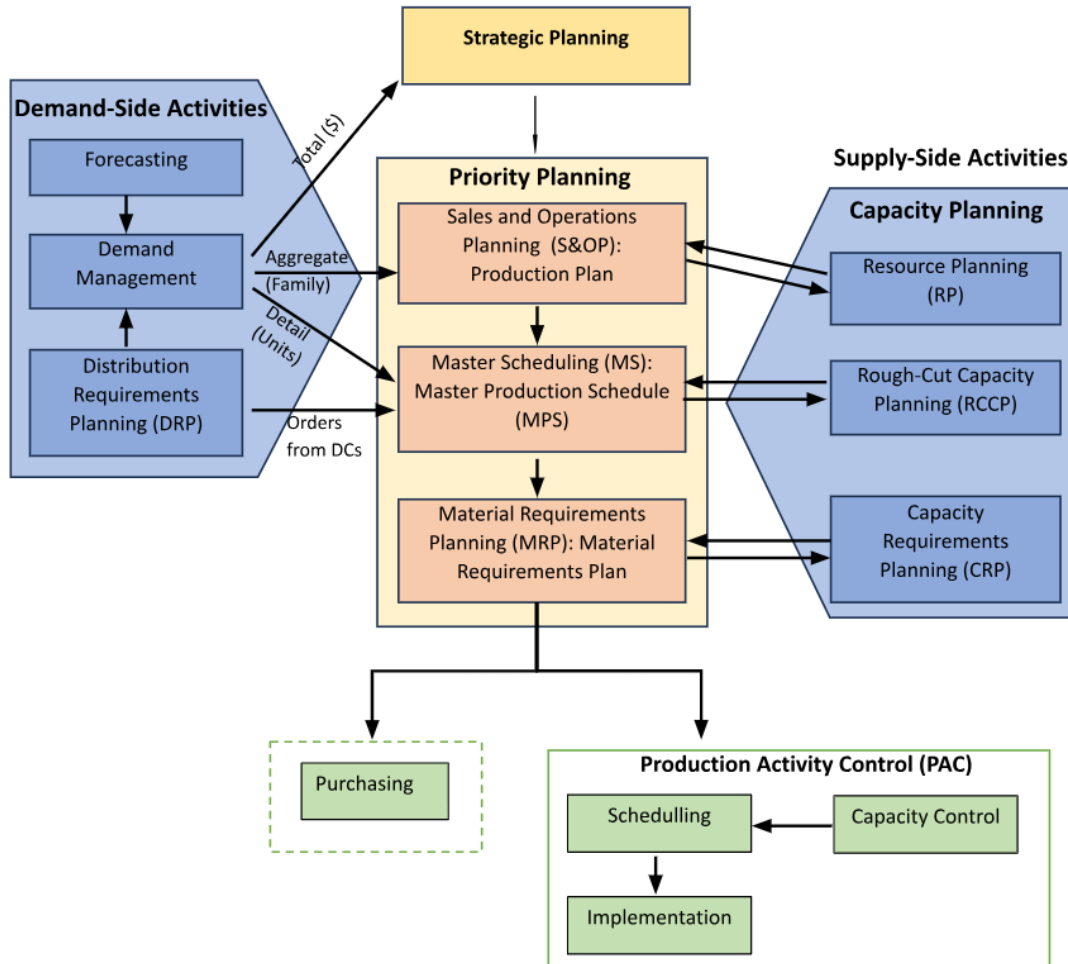
La Figura 2 ilustra las diferentes estrategias para los productos que podrán aplicarse de acuerdo con el tipo de industria bajo análisis.

Figura 3: Estrategias de producción



A continuación, se detallarán los procesos involucrados para llevar adelante la Planificación y programación de la producción. Como se puede observar en la Figura 3, la planificación estratégica está conformada por las siguientes etapas:

Figura 4: Flujo de la planificación estratégica



(Association for Supply Chain Management, 2019)

El proceso de “S&OP”, Sales & Operations Planning, es el proceso mediante el cual a través de un stock objetivo y prioridades establecidas, se dimensionan los volúmenes de producción. Para ello se usará el “Macroplan”, que será el plan confeccionado por línea de envasamiento y célula de fabricación, y que será la entrada de datos para dimensionar recursos productivos, horas de trabajo, capacidad de ocupación de las máquinas de fabricación y envasado. El Macroplan agrupa por línea de envasado un conjunto de familias de productos. En forma acorde a las restricciones de capacidad y otras consideraciones, el volumen será acotado y ajustado mediante la planificación de “Resource Planning” y “Rough Cut Capacity Plan”. El Macroplan tiene como input el pronóstico de ventas, stock al cierre, días hábiles disponibles al mes, la capacidad máxima y mínima por línea de fabricación y envasado, considerando expresamente las paradas preestablecidas por mantenimiento y días de producción por mes, de manera tal que por ajustados cálculos obtiene el plan de producción agregado. La propuesta del

plan será convalidada con la capacidad aprobada y proyectada, con un adicional de Bias aprobado del 10% de la venta de ese mes. En aquellos casos que la propuesta supere la capacidad establecida, se armará una nueva propuesta o plan alternativo que podrá involucrar horas extras, adicionar un turno productivo, etc, y que finalmente será validado y aprobado en la revisión de SMR (Supply Management Review) en el proceso de IBP.

Como segunda etapa, el “Master Production Schedule” es la programación de la producción cuyo punto de partida es el Plan agregado de producción proveniente del *Macroplan*. El horizonte del mismo es establecer los volúmenes a producir en el “frozen period” que actualmente es de cinco días y el “firm period” que adiciona trece días. Los primeros cinco, y tal como su nombre lo indica, son órdenes de producción ya emitidas y liberadas cuya confirmación de materia prima y pack se realizaron en forma previa, y cuya preparación para comenzar el lote de producción está confirmada. Los siguientes trece días son aún “process orders” que no se encuentran liberadas ya que pueden sufrir modificaciones y cuya materia prima y pack también se encuentra reservada, no obstante, puede aún tener entregas programadas pendientes de materia prima o pack para ingresar que de no cumplirse deben reprogramarse. La programación del MPS se realiza actualmente en forma automática a través de SAP, que cuenta actualmente con algunas problemáticas en su parametrización, por lo que su output será ineficiente o inequívoco. El proceso como tal no se encuentra automatizado en su totalidad, y debido a ello, se exportan las prioridades de fabricación propuestas por SAP, y se hace una priorización en una planilla denominada “semáforo de fabricación”, donde mediante semáforos se alertan los productos en falta o en punto de reposición para convertir la “plan order” en “process order” debiendo generar días con la programación de producción firme. El punto de reposición por producto es calculado mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q \text{ Replenishment} = \text{Kanban Max} - \text{Projected Stock} \quad (1)$$

$$\text{Projected Stock} = \text{Stock} - \text{Delivery} - \text{SalesOrd} + \text{Process Orders} \quad (2)$$

El Kanban Max es la política de stock máximo por producto que se desea almacenar. Su cálculo contempla venta promedio y pronóstico promedio, tiempos asociados a la fabricación y traslados hasta su disponibilidad en depósito, y desvíos asociados a los mismos. Su revisión se ejecuta con una frecuencia de seis meses.

Como resultado del proceso anterior, se corre el MRP (Material requirements plan) en SAP donde se obtendrán todos los requerimientos de las materias primas y pack para completar la producción proyectada. Como se puede observar en la Figura 3, cada proceso es revisado y ajustado de acuerdo a la planificación autorizada. Es importante mencionar que el proceso de IBP es un proceso estratégico que nuclea la toma de decisiones y que será quien apruebe o modifique dicha planificación, es un proceso integral y transparente donde intervienen todas las direcciones de cada sector involucrado, Marketing, Comercial y planificación de la demanda, Supply Chain, Finanzas, y por último la dirección del negocio.

1.2. Problema y objetivo

Como se describió anteriormente, en el proceso de Master Production Schedule y Material requirements Planning es donde ocurre una diferencia entre lo planificado y aprobado

en el Macroplan y lo que SAP refleja en el sistema. Los principales problemas se deben esencialmente a que las restricciones por célula de producción y envasamiento (por “MRP controller”) no se encuentran bien definidas y parametrizadas en sistema, es decir, no están mapeadas las restricciones por capacidad, resultando en volúmenes de producción proyectados que en la práctica no reflejan la capacidad instalada ni los volúmenes previamente aprobados por el Macroplan. Como segunda restricción, se tiene la generación de órdenes de proceso proyectadas en base a dicha planificación que proyectan inventario y consumo futuro con desvíos, ocasionando desvíos en las cantidades y fechas en que deben ser entregadas las materias primas para comenzar el proceso de producción. Adicionalmente, las diferencias de inventario tanto de consumo de materia prima como de producto terminado generan órdenes de reposición que a su vez originan mayores desvíos.

Debido a la problemática descrita, se les solicita a los planificadores de producción confeccionar un plan mensual de elaboración por producto terminado, atendiendo las restricciones de manufactura y a fin de alcanzar los stocks deseados con el objeto de ser input al MPS manual obteniendo así el plan de producción detallado por producto terminado para posteriormente confeccionar la proyección de la planificación de materias primas y pack, con un mayor ajuste a la capacidad instalada. Como el MPS evalúa una proyección a largo plazo, el pronóstico de ventas cobra una importancia significativa para la confección del mismo en un plazo de 12 meses.

El MPS será luego el input al MRP, donde mediante las “Bills of material” (BOMs), o recetas de materiales, se hará la explotación de las materias primas y pack. La Tabla 1 proporciona las entradas necesarias para la corrida del MRP.

Tabla 1: Entradas del Material Requirements Planning

<i>Entrada</i>	<i>Descripción</i>
Master production schedule (MPS)	Volúmenes proyectados de producción, en estados de órdenes programadas y planificadas, con fecha de entrega
Bills of material	Receta de materia prima y pack por producto terminado
Factores de planificación	Datos de inventario que suelen ser estáticos:
	Tamaño de lote
	Lead time
	Tasa de desperdicio
Inventario	Stock de seguridad
	Es dinámico y son tomados en cuenta:
	En mano
	Alocado
	En orden

(Association for Supply Chain Management, 2019)

La presente tesis tiene como objetivo modelizar este problema por medio de un modelo de lot sizing, con el objetivo de obtener un plan de producción por producto terminado eficientizando el proceso y atendiendo al mismo tiempo:

- la política de stock proyectada,
- restricciones de capacidad instalada,

- restricciones de lotes de fabricación por célula de producción, y
- restricciones de inventario y capacidad de almacenamiento.

Al obtener un plan de producción por producto terminado de forma automatizada, se podrán reducir las horas de trabajo y hacer foco en la planificación y programación para atender el horizonte de 18 días (sumatoria del firm y frozen period), crear las órdenes de proceso y dar mayor visibilidad a toda la cadena de abastecimiento.

1.3. Análisis de bibliografía

Existen en la bibliografía diferentes trabajos que implementan modelos de lot sizing en diversas industrias.

El trabajo titulado “Lot sizing and scheduling - Survey and extensions” (A. Drexel, 1996) presenta diferentes modelos de lot sizing que buscan optimizar una combinación de los costos de set up de las máquinas y los costos de inventario. Existe un “tradeoff” entre estos dos objetivos, puesto que ante bajos costos de set-up hay producciones con lotes mayores, y por lo tanto mayores costos asociados al stock.

Los avances en lot sizing han llevado desde el modelo EOQ (Economic order quantity), cuyas premisas son de una producción de una sola línea, sin restricciones por capacidad, y donde se asume demanda estacionaria y horizonte de planificación infinito, al “economic lot scheduling problem” (ELSP), en el cual las restricciones por capacidad son agregadas. El modelo denominado “capacitated lot sizing problem” (CLSP) puede considerarse como una extensión de los anteriores, y se trata de un problema para múltiples productos. Cabe mencionar que las decisiones de scheduling no son parte del modelo que detallaremos a continuación.

En este modelo, el conjunto T representa el conjunto de períodos, mientras que el conjunto J representa el conjunto de productos. Se utilizan las siguientes variables de decisión:

- $I_{j,t}$: Stock del producto j en el período t
- $q_{j,t}$: Producción del producto j en el período t
- $x_{j,t}$: Variable binaria que indica si hay setup del producto j en el período t

Además, el modelo utiliza los siguientes parámetros:

- C_t : Capacidad disponible de la máquina en el período t
- $d_{j,t}$: Demanda externa del producto j en el período t
- h_j : Costos de almacenamiento por unidad del producto j
- $I_{j,0}$: Inventario inicial para el producto j
- p_j : Capacidad requerida para producir una unidad del producto j
- s_j : costo de setup para el producto j
- T : número de períodos

Con estas definiciones, el modelo es el siguiente.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{j,t} + h_j I_{j,t}) \quad (3)$$

S.t.

$$I_{j,t} = I_{j,t-1} + q_{j,t} - d_{j,t} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4)$$

$$p_j q_{j,t} \leq C_t x_{j,t} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j q_{j,t} \leq C_t \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$x_{j,t} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (7)$$

$$I_{j,t}, q_{j,t} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8)$$

El objetivo es minimizar la suma de los costos de setup y almacenamiento. La restricción (4) representa el balance de inventario, mientras que la restricción (5) indica que sólo se producirá el ítem si se realiza el set up de la máquina. Las restricciones de capacidad están dadas por (6). La restricción (7) especifica que las variables de set up son binarias, mientras que (8) restringe las variables a valores positivos.

En el trabajo “Modelo de Planificación de Producción para un Sistema Multiproducto con Múltiples Líneas de Producción” (Viveros, 2010) se presenta un modelo para la planificación de la producción en un sistema multi-producto con múltiples líneas de producción para la industria de fabricación de medios de acero para la molienda de minerales cuya estrategia de planificación es la de “Make to stock”.

El modelo propuesto considera un horizonte de planificación de 12 meses y las soluciones deben ser revisadas mensualmente. El modelo considera la capacidad disponible y la asignación de operarios a cada línea de producción. El modelo de planificación propuesto involucra las siguientes variables de decisión para la planificación de la producción: Volumen de producción por producto, volumen de compras de materias primas, necesidades de materias primas para la producción y por último niveles de inventario de producto terminado en cada mes del horizonte de planificación. El objetivo es minimizar el costo de planificación, expresado como el costo de fabricación, costo de inventario, de productos y su penalización por escasez, más el costo de mantener materia prima en inventario.

A diferencia del modelo presentado al comienzo de la sección, este último habilita escasez, es decir, incumplimiento en el atendimento del producto terminado. Asimismo, el modelo presenta flexibilidad y adaptabilidad ante cambios en las instalaciones permitiendo tener una precisa visibilidad en la productividad y costos asociados.

Los dos modelos presentados, no consideran el scheduling como parte de los resultados y toma de decisión, por lo que dicha actividad va a ejecutarse posteriormente.

La construcción de modelos con diversas aplicaciones es una búsqueda incansable para la industria y su desarrollo sigue proporcionando diferentes análisis integrados. Tal es el caso presentado en el artículo “Joint Economic Lot-sizing in Multi-product level Integrated Supply Chains” (Gharaei, 2020). Los Problemas de Dimensionamiento de Lotes Económicos (JELPs) han recibido mucha atención en los últimos años porque son la base para impulsar el avance del conocimiento en la cadena de suministro (Supply Chain). JELP puede gestionar eficientemente la Supply Chain mediante la promoción de la cooperación entre los niveles de la cadena. En este artículo, se aborda el JELP en el contexto de una integración de cuatro niveles con el objetivo de minimizar el costo total de inventario. El modelo es multiproducto y considera el re-abastecimiento de materias primas. Las restricciones incluyen la limitación del espacio físico, el costo de adquisición, los pedidos y las limitaciones del dimensionamiento de lotes. Los objetivos son determinar la política de lot sizing y el período óptimo de tal manera que se minimice el costo total de inventario, cumpliendo con dichas restricciones.

El enfoque del siguiente trabajo abordará una combinación de modelos, partiendo de las consideraciones del modelo CLSP, cuya característica es la de un modelo con multiproducto, demanda dinámica, y capacidades limitadas, con la adición de permitirle al modelo incumplimiento, tal como es presentado en “Modelo de Planificación de Producción para un Sistema Multiproducto con Múltiples Líneas de Producción” (Viveros, 2010).

Capítulo 2. Datos

En este capítulo se analizan las fuentes de datos necesarias para llevar a cabo el proceso de planificación de la producción, materias primas y pack. Como se ha mencionado anteriormente, el pronóstico de ventas es un aporte necesario para todo el proceso, por lo que primero describimos cómo se procesan los datos en la actualidad.

El departamento de demanda será el responsable de proveer el pronóstico de ventas para el horizonte bajo análisis. Para ello, partirá mensualmente de una base estadística, la cual ajustará posteriormente con inputs provenientes del mercado y de los departamentos de marketing y ventas. A modo descriptivo, detallaré los modelos de remoción de outliers que se usan en la práctica así como también los modelos estadísticos que se utilizarán para crear la base estadística.

El primer análisis que ejecutará el departamento de Demanda es el de la identificación de outliers, cuyo objetivo será el de remover inconsistencias o datos atípicos de los datos históricos para que luego al aplicar el modelo estadístico seleccionado represente de forma más precisa la venta futura. Cabe mencionar que existen diversos modelos de remoción de outliers, pero los que detallaré a continuación son los que la compañía está ejecutando actualmente.

Al tratarse de un proceso mensual, todos los meses se lleva a cabo la tarea de actualizar las ventas del último mes, y por consiguiente ejecutar los modelos que se detallan a continuación para el mapeo de outliers.

1. Detección por método Z-score para diferentes niveles de agregación
2. Detección por método boxplot para diferentes niveles de agregación
3. Detección y revisión por parte del planificador

El primer método utilizado es el Z-score, cuya expresión queda descripta en la ecuación (9), el mismo medirá cuántos desvíos estándar un punto de datos está por encima o por debajo de la media del conjunto de datos. El desvío estándar (11) se define como una medida que se utiliza para cuantificar la variación o la dispersión de un conjunto de datos. Un desvío estándar bajo indica que la mayor parte de los datos de una muestra tienden a estar agrupados cerca de su media (también denominada el valor esperado), mientras que una desviación estándar alta indica que los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio. El Z-score será el resultado del cociente entre, la diferencia de la venta y su media, y su desvío estándar. Generalmente el umbral de decisión para determinar si se trata de un valor atípico es establecido en $Z = \pm 3$, y es el utilizado por el departamento de Demanda, señalizando todos aquellos que superen ese umbral para luego ser mapeados como outliers.

Para el caso bajo estudio, tanto el desvío estándar como la media se calcularán para el horizonte de 36 meses de historia de ventas, y por cada venta computada por mes se calculará el Z-score para un nivel de agregación determinado. Todos aquellos puntos por encima o por debajo de 3 serán considerados como valores atípicos y serán corregidos posteriormente para correr el pronóstico.

$$Z = (x - \mu)/\sigma \quad (9)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 / n} \quad (11)$$

El segundo método complementario utilizado es el boxplot que consiste en detectar valores atípicos que son puntos que están significativamente alejados de los extremos de los bigotes en el diagrama de caja. Son considerados valores atípicos aquellos que se encuentren 1.5 del IQR por encima del tercer cuartil (Q3) o por debajo del primer cuartil (Q1). La "caja" en el boxplot representa el rango intercuartílico (IQR), que es la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1) y la línea central dentro de la caja representa la mediana.

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (12)$$

El límite inferior del bigote se calcula restando 1.5 veces el IQR del primer cuartil:

$$Q1 - 1.5 \times IQR \quad (13)$$

El límite superior del bigote se calcula sumando 1.5 veces el IQR al tercer cuartil:

$$Q3 + 1.5 \times IQR \quad (14)$$

Por último, el tercer método proviene del planificador de demanda quien revisará individualmente el portfolio y acorde a la información proveniente del mercado e interna de la compañía identificará los dichos puntos a corregir.

Una vez detectados todos los outliers del historial de ventas, cuyo horizonte serán 36 meses, se ajustarán los mismos mediante interpolación lineal.

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \quad (15)$$

En esta expresión, (x_0, y_0) y (x_1, y_1) son los dos puntos conocidos más cercanos al valor que deseamos estimar, x es el valor en el eje x para el cual queremos estimar el valor correspondiente en el eje y, y finalmente y es el valor interpolado que estamos buscando.

Una vez que todos los valores atípicos fueron mapeados y corregidos, se procede a correr el pronóstico de ventas estadístico. Cabe destacar que en la actualidad se están utilizando modelos de predicción intrínsecos, y que se están explorando variables exógenas para su modelización, como lo son la inflación, el PBI, el índice de la construcción, etc.

Los modelos estadísticos utilizados son:

1. Simple Moving Average
2. Simple Exponential Smoothing
3. Double Exponential Smoothing
4. Triple Exponential Smoothing
5. ASE (non-seasonal, no trend)
6. ASE (non-seasonal, trend)
7. ASE (seasonal, no trend)
8. ASE (seasonal, trend)
9. ASE (croston's method)
10. ETS (non-seasonal, trend)
11. ETS (non-seasonal, trend) - Brown
12. ETS (non-seasonal, trend) - Holt
13. ETS (seasonal, no trend)
14. ETS (seasonal, trend)
15. Linear regression (OLS) + ARIMA
16. Ensemble

Tanto ARIMA, como Exponential smoothing son detallados en “*Forecasting: principles and practice*” (Athanasopoulos, 2025).

Por las variaciones macroeconómicas que son de gran impacto en la industria bajo estudio, aplicar un modelo con tendencia puede impactar negativamente en el pronóstico, ya que la pendiente puede ser muy creciente o muy decreciente. Es por estos motivos que en la actualidad se está ejecutando el modelo de suavizado exponencial doble, que resulta ser adecuado para series de tiempo que no muestran una tendencia clara, pero exhiben patrones estacionales. En este caso, el modelo se utiliza para capturar y predecir los patrones estacionales en los datos sin considerar una tendencia.

El método Holt Winters, o Modelo de suavizado exponencial triple, es explicado en detalle en el paper “El Método de Pronóstico Holt-Winters” (Rivero, 2016).

El modelo estadístico y el nivel de agregación en el cual se correrá mensualmente el estadístico es revisado anualmente en el estudio de *forecastability*. Este estudio propone para cada nivel de agregación seleccionado con antelación, y sobre una base histórica de cinco años con la corrección de sus outliers, tomar una base de datos de entrenamiento, y correr diferentes modelos con diferentes parámetros (ejemplo Holt & Winters con α , β y γ), y luego sobre datos reales, en nuestro caso, sobre las ventas 2023, se medirán los mejores resultados en el nivel de optimización.

Los niveles de agregación, o niveles de cálculo del pronóstico estadístico, son niveles de agregación que estarán dados por atributos de producto, tales como marca, submarca, etc, y atributos de clientes, como pueden ser división, canal, etc. Es importante mencionar que cuanto más desagregado mayor será la complejidad de ajuste del modelo.

El nivel de optimización se define como el nivel donde los resultados deben ser óptimos o mejorados. Los usados a la fecha son:

1. **Forecast Accuracy Lag-3.** Siendo F_i el pronóstico en el período i y la facturación A_i en el período i . El forecast accuracy va a variar en un rango de 0% -100%. En la práctica, los resultados de Argentina del accuracy rondan entre un 50% y 60%. Cabe destacar que Lag-3 implica que se medirá la versión de forecast liberada tres meses anteriores a la facturación de dicho mes.

$$FA = [0, 1 - \sum_i \frac{|(F_i - A_i)|}{A_i}]$$

2. **Forecast Bias Lag-3.** A diferencia del FA, el indicador de bias sólo medirá en términos porcentuales si se ha entregado un pronóstico por encima o por debajo de la facturación sin contemplar los desvíos absolutos, por lo que existe una suerte de compensación entre los productos. Sus resultados idealmente no superarán el -5% y +5%. Se hará foco en la tendencia de los bias, de tener sostenidamente pronósticos por encima de la facturación o por debajo y la magnitud de dicho desvío.

$$FBIAS = \frac{F_i - A_i}{A_i}$$

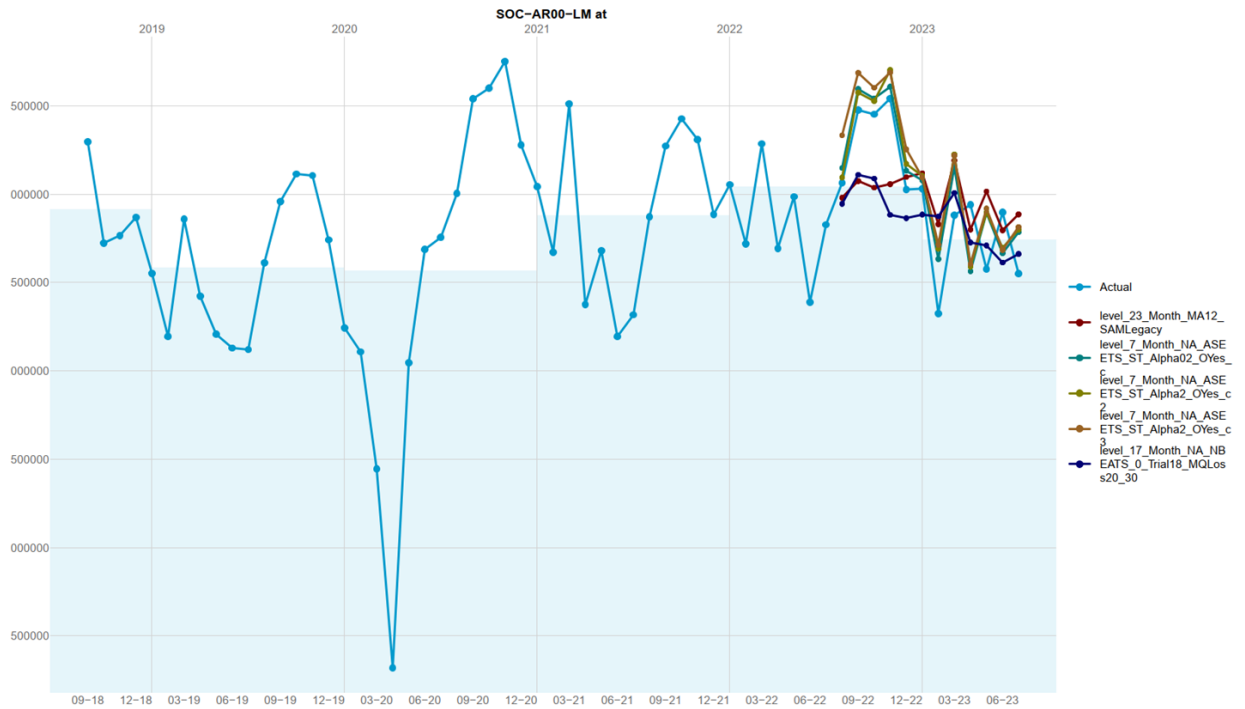
3. **Forecast Stability.** El mismo medirá las variaciones entre las versiones de pronóstico liberadas mensualmente. El cálculo que se usa en la actualidad es el promedio de los desvíos de pronóstico para los tres lags.

Estos indicadores se reportan en el nivel de agregación país y producto terminado, en nuestro caso serán las ventas del mercado local argentino y producto terminado. A modo de ejemplo, la Tabla 2 muestra los últimos resultados del estudio de pronosticabilidad. Por su parte, la Figura 4 reporta las ventas históricas y la variación entre los diferentes modelos estadísticos.

Tabla 2: Resultados del análisis estadístico

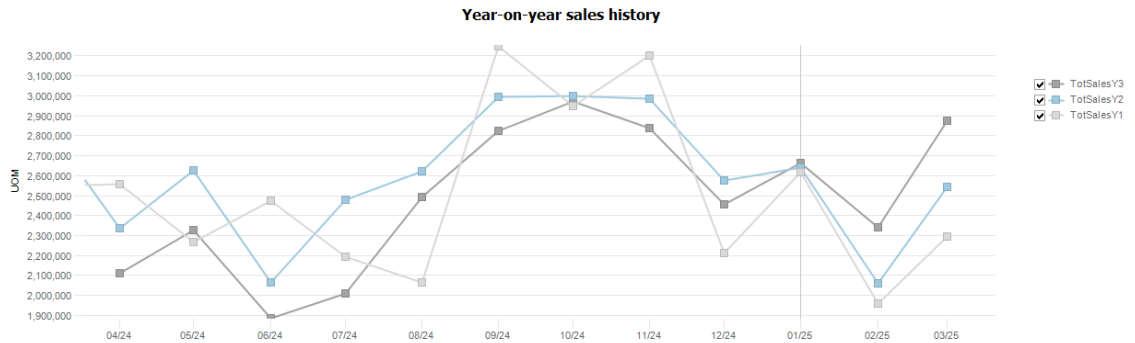
Dataset	Calculation Level	Method	Reporting Level 1: Demand Group & SKU			Aggregation: Demand Group (Total)		
			FA3	FB3	FS3	FA3	FB3	FS3
AN_DSA_SOC_23	DMR & Product Banner	SAMLegacy	51.5	0.6	9.1	86.7	0.3	2.6
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division	OMP_FT_BU_MA6	52.7	-0.2	11.4	90.8	-0.4	3.6
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division	SeasTrend	53	2.6	6.7	89	2.3	3.6
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Sub-Brand	OMP_FT_BU_MA6	52.2	1.2	12.2	90.7	1	3.1
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division & Sub-Brand	OMP_FT_BU_MA6	52.2	1.3	12.2	90.7	1	3
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Series	OMP_FT_BU_MA6	51.6	1.7	12.3	90.5	1.4	2.7
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Sub-Brand	OMP_FT_CU_2_MA6	52.5	2.2	11.7	90.1	2	2.8
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division & Sub-Brand	OMP_FT_CU_2_MA6	52.5	2.2	11.7	90.1	2	2.8
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division	OMP_FT_CU_2_MA6	51.8	3.4	11	90	3.2	3.2
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Sub-Brand	OMP_FT_CU_1_MA6	52.3	2.2	12.7	89.9	1.9	3.3
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division & Sub-Brand	OMP_FT_CU_1_MA6	52.3	2.2	12.7	89.9	1.9	3.2
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Series	OMP_FT_CU_1_MA6	52.5	0.4	13.5	89.3	0.1	3.7
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Sub-Brand	SeasTrend	52.2	3.1	8.9	89.3	2.8	2.8
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division & Sub-Brand	SeasTrend	52.2	3.1	8.9	89.3	2.8	2.8
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Series	OMP_FT_CU_2_MA6	52.1	0.9	12.8	89.3	0.6	3.6
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & SKU	OMP_FT_BU_MA6	50.4	0.3	12.5	89.2	0.1	2.4
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Division	OMP_FT_CU_1_MA6	51.9	1.4	12	89.1	1.2	5.1
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Series	SeasTrend	51	3.2	9.6	89.1	2.9	2.8
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & SKU	SeasTrend	49.1	2.8	12.7	89	2.7	2.7
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Banner	ASEETS_ST_Alpha2_OYes_c3	48.2	5.4	9.7	88.5	4.9	2.9
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & SKU	OMP_FT_CU_2_MA6	51.4	-0.2	13.6	88.3	-0.3	3
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & SKU	OMP_FT_CU_1_MA6	51.5	-0.3	13.2	88.2	-0.5	3
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Banner	ASEETS_ST_Alpha2_OYes_c2	46.7	7.5	10.2	86.5	7	3.6
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & SKU	NBEATS_0_Trial18_MQLoss20_30	54.2	-7.7	13.6	86.2	-8.3	3.4
AN_DSA_SOC_23	Demand Group & Product Banner	ASEETS_ST_Alpha2_OYes_c	38.5	16.1	11.2	77.9	15.6	4.6

Figura 5: Variaciones entre modelos estadísticos



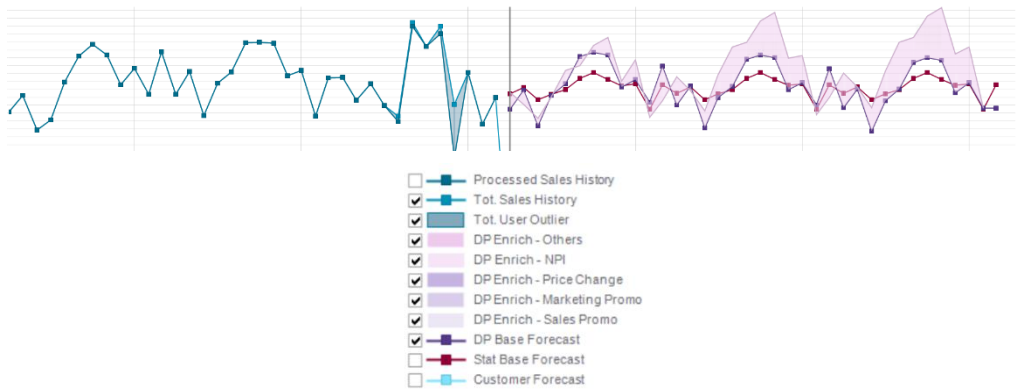
Dicho resultado estadístico se usará como base para el pronóstico final que será entregado a Supply Chain. Sobre la misma, se agregan los nuevos productos o lanzamientos, se parametrizan los productos que se van a discontinuar, se realizan los enriquecimientos producto de promociones y campañas, y se ajustan los volúmenes producto de variables macroeconómicas, tales como incremento de precios y crecimiento en la industria.

Figura 6: Perfil de demanda año a año



La Figura 5 muestra el perfil de la demanda agregada. Los años de venta ajustados con sus outliers considerados para el pronóstico final son de Abril 2021 a Marzo 2024. Queda evidenciado tan sólo con observar los datos históricos que sí existe una estacionalidad que indica la temporada alta en los meses de Agosto hasta Diciembre, y que vuelve a ver una especie de repunte en el mes de Enero, que suele tratarse, en su mayoría, de órdenes de compra no cumplidas en el mes de Diciembre por tratarse de ser un mes cuyo calendario para el entrega es reducido. Como se ha descrito al comienzo, los modelos estadísticos que integran la estacionalidad en su cálculo suelen tener un mejor ajuste de los datos y por lo tanto un mejor pronóstico. Los resultados descritos se ilustran en la Figura 6, que muestra la distribución de las ventas con sus datos reales y su pronóstico.

Figura 7: Ventas históricas + pronóstico



Con la actual configuración del modelo estadístico, queda demostrado en el cuadro superior, que la estacionalidad no se ve reflejada en los picos máximos y mínimos del pronóstico estadístico, y es aquí donde el enriquecimiento del pronóstico cobra relevancia como se observa en la figura 6. Los productos son enriquecidos (ajuste en rosa claro) para alcanzar las expectativas de venta del mercado, y de esta forma dimensionar con antelación toda la cadena de Supply Chain para atender dicha demanda. Luego del último estudio de *forecastability* es esperable que los modelos propongan un mejor ajuste de los datos. En cuanto a la tendencia, se ve reflejado en el pronóstico una tendencia descendente con una pequeña pendiente negativa que se encuentra alineada con la tendencia que presentan los datos históricos.

Ahora bien, una vez obtenido el pronóstico de ventas se extraen los siguientes datos provenientes de una transacción de SAP:

1. Stocks a la fecha de cierre (stocks iniciales)
2. Stocks proyectados por Kanban (Stocks finales)
3. Órdenes de producción abiertas
4. Deliveries, productos ya reservados para ser distribuidos

Con esta información se calcula el volumen a producir de acuerdo al siguiente modelo:

$$S_{final} = S_{inicial} - Deliveries + Producción - Demanda \quad (18)$$

Resultando la producción dada por:

$$Producción = S_{final} + Deliveries - S_{inicial} + Demanda \quad (19)$$

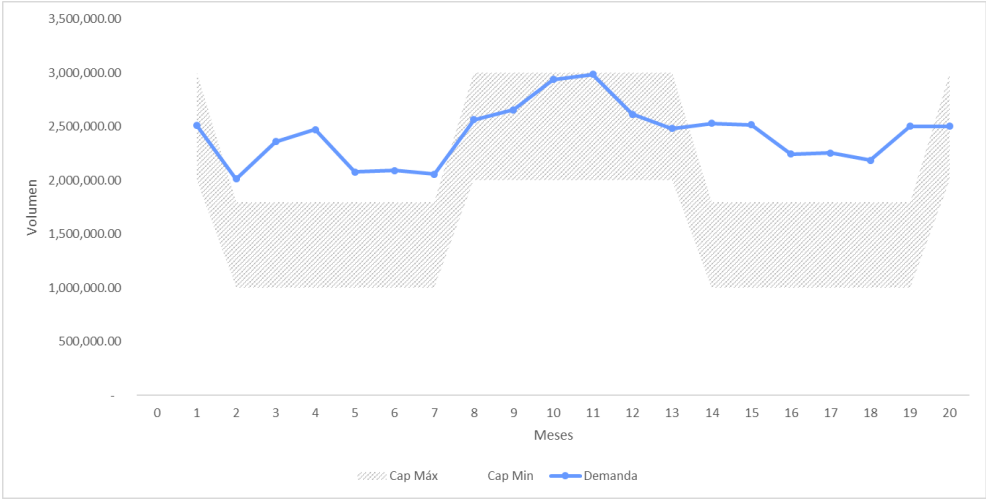
Con este resultado se hace un ajuste manual por lote de fabricación para acotarlo y ajustarlo al Macroplan previamente aprobado para el horizonte S&OE (mes actual + tres meses). Este resultado por producto terminado es ingresado a los planes de pack y de materia prima, que luego es explotado en unidades por el MRP.

Para la corrida de MRP, cada FINI o producto terminado contiene en su fórmula un SEFI o semielaborado (semi finished good) asociado que luego, mediante las fórmulas cargadas en sistema (BOM, Bill of material) se hace la explosión por para obtener el plan proyectado de materia prima. Para la planificación de pack, la explosión será el resultado del volumen proyectado por producto terminado ya que cada producto terminado tiene un envase exclusivo por capacidad de 0.5 Lts, 4Lts, etc, que tiene una litografía específica.

A continuación, se detallarán en forma gráfica, las variables que componen las entradas y restricciones del modelo en forma agregada, es decir, para todo el portafolio bajo análisis. Comenzando con la Figura 7, es aquí donde se evidencia el nivel en el que se encontrará la demanda pronosticada vs la capacidad instalada de producción. En los meses de baja temporada

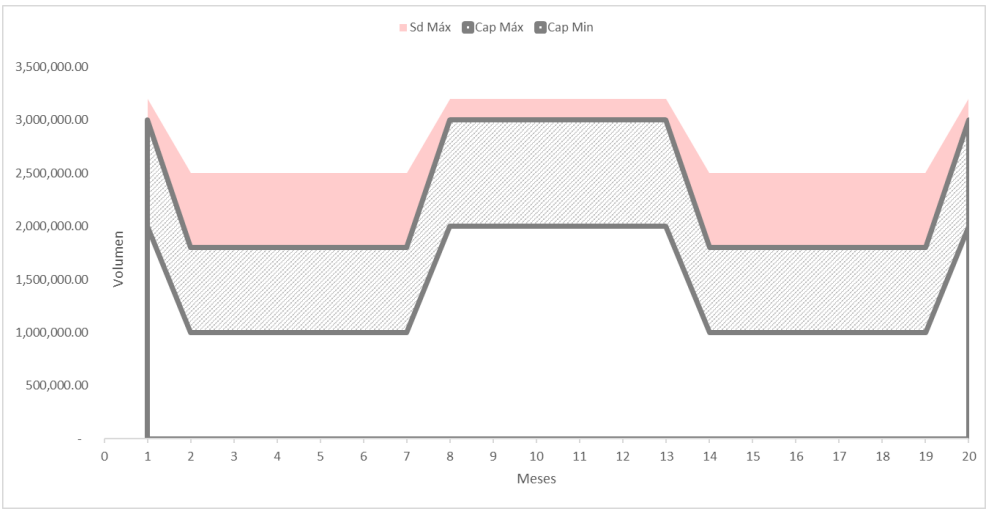
productiva, la demanda se encontrará por encima de dicha capacidad incurriendo de esta manera en el consumo del stock. El volumen de producción quedará delimitado por la zona gris.

Figura 8: Capacidad de producción máxima y mínima vs Demanda



Por último, en la Figura 8, se vislumbra cuál es el nivel de la capacidad de almacenamiento vs la capacidad máxima productiva. El color rosa representa la capacidad de almacenamiento de stock en el depósito, dada por S_d , y por debajo en gris la capacidad productiva que oscila entre la capacidad mínima y la capacidad máxima. Se puede observar que la capacidad de almacenamiento del depósito tiene holgura para almacenar un mayor volumen.

Figura 9: Capacidad de Stock Máxima vs Stock máximo de depósito



Capítulo 3. Metodología

El principal aporte de esta tesis es el planteo de un modelo de programación lineal de lot sizing para planificar la producción y obtener varios escenarios, en el marco del procedimiento descrito en el capítulo anterior. Los modelos de lot sizing se implementan por medio de formulaciones de programación lineal entera, y describimos en primer lugar esta formulación.

Como se ha descrito en el capítulo 1, existen diversos modelos de lot sizing que atienden diferentes requerimientos y restricciones para su aplicación en la industria. En la compañía bajo análisis, el incumplimiento tiene un rol significativo ya que es una problemática que viene enfrentando y que repercute sustancialmente en la venta de sus productos, es por ello que el modelo propone su minimización con el objetivo de atender toda la venta mensual posible. Su importancia radica en que se atiendan todos los productos con igual importancia por dos motivos: primero, cada orden de compra del cliente, proyectada en el pronóstico de ventas, puede contar con varios productos y se busca atender todos ellos sin excepciones, y segundo, los stocks máximos y de seguridad que se usan en el modelo contemplan variaciones en la demanda, dando mayor stock asociado a los productos de mayor margen.

El análisis o trade off en costos por incumplimiento serán analizados en la planificación de escenarios de los resultados presentados. Resulta importante remarcar que el proceso de IBP, deberá fijar el volumen de inventario que atiende las restricciones de costos, y que será revisado mensualmente en el proceso de IBP. El modelo de lot sizing que veremos a continuación se ha customizado ya que resulta suficiente para atender el problema que enfrenta actualmente.

La minimización de setups y sus costos asociados serán contemplados y calculados a la hora de realizar el scheduling o programación de producción diaria. Esta tarea requiere en forma diaria generar las órdenes de producción en sistema asignando un tamaño de lote dentro de su célula de fabricación y asignar los envasados tales que minimicen el setup. Cabe destacar que cada lote de producción puede variar de un mínimo de 100 litros, fabricado en tanqueta, a un máximo de 20.000 litros.

Esta formulación utiliza los siguientes conjuntos:

- Llamamos I al conjunto de productos, y utilizaremos habitualmente el índice i para referirnos a los elementos de este conjunto.
- Llamamos $T = \{1, \dots, n\}$ al conjunto de períodos (meses), y utilizaremos habitualmente el índice t para referirnos a los elementos de este conjunto. Definimos también el conjunto $T_0 = \{0, \dots, n\}$.
- Llamamos $M = \{A, B, C, D\}$ al conjunto de células de producción, y utilizaremos habitualmente el índice m para referirnos a los elementos de este conjunto.

El modelo buscará minimizar el incumplimiento de la demanda, ya que en la práctica no todas las órdenes de compra mensuales son cumplidas y distribuidas al cliente final dentro del mismo mes, por lo que será válido en el modelo desatender la demanda en sistema. Para modelar estas decisiones, el modelo utiliza estas variables:

- $x_{i,m,t}$: Cantidad a producir del producto i en la célula de producción m en el período t .
- $s_{i,t}$: Stock de cierre de mes para el producto i en el período t .
- $In_{i,t}$: Incumplimiento de la demanda para el producto i en el período t .
- $z_{i,m,t}$: Variable binaria de producción, indica el uso de la célula de producción en cada período para cada producto.

La variable de producción $x_{i,m,t}$ es una variable continua y positiva, que indica el volumen a fabricar del producto i en la célula m durante el período t . Los lotes de producción son asignados a cuatro células de producción denominadas en el modelo como A, B, C, y D, las cuales corresponden a las células de blancos, bases tinting, colores y enduido respectivamente. Cada célula contiene sus equipos de molienda, tanques y envasadoras dedicadas, por lo que cada célula será restringida en el modelo por su capacidad máxima.

La variable $s_{i,t}$, es una variable también de carácter continuo y positiva, que computa el stock del producto i al final del período t . Este stock se inicia al comienzo del período uno con un stock inicial.

La variable $z_{i,m,t}$ es una variable binaria que indicará si habrá producción para un determinado producto en cada célula para un período determinado. Su resultado será 1 de requerir producción o 0 en caso contrario. Esta variable refleja con exactitud lo que acontece en la práctica, ya que no todos los productos son fabricados en todos los períodos, y es principalmente este el motivo por el cual se lleva un inventario de los mismos.

Finalmente, la variable de incumplimiento de demanda es muy relevante dentro del modelo, ya que la compañía incurrirá en costos asociados a la pérdida de dicha demanda por diversos motivos, como pueden ser la falta en estantería del producto a la hora del cliente de ejecutar la compra, la potencial compra de productos de marcas alternativas, la caída de la orden de compra por no disponer de tiempos de reposición, entre otras. El incumplimiento, dado por $In_{i,t}$, absorberá la demanda que no se venderá en el período t y que será luego input para atender en el período $t + 1$. El mismo puede acumularse producto de la falta de stock para atender dicha demanda.

Al modelo que detallaré a continuación se lo restringirá con los siguientes parámetros:

- S_d : Capacidad máxima de almacenamiento del depósito
- Cap_t : Capacidad máxima de producción en planta
- $S_{max i}$: El stock máximo para el producto i
- $S_{min i}$: El stock mínimo para el producto i
- $Capmap_{m,t}$: Capacidad máxima por máquina m en el período t
- $Capmaqprod_{i,m}$: Capacidad máxima del producto i en la máquina m

Con estos elementos, el modelo a considerar es el siguiente.

$$Min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} In_{i,t} \quad (20)$$

S.t.

$$s_{i,0} = s_i \quad \forall i \in I \quad (21)$$

$$In_{i,0} = In_i \quad \forall i \in I \quad (22)$$

$$s_{i,t} = s_{i,t-1} + x_{i,m,t} - (D_{i,t} - In_{i,t-1}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{i,m,t} \leq Cap_t \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{t \in T} s_{i,t} \leq Sd \quad \forall t \in T \quad (25)$$

$$s_{i,t} \leq S_{max_i} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (26)$$

$$s_{i,t} \geq S_{min_i} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{i \in I} x_{i,m,t} \leq Capmap_{m,t} \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (28)$$

$$z_{i,m,t} \leq Capmaqprod_{i,m} \quad \forall i \in I, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (29)$$

$$x_{i,m,t} \leq BigM * z_{i,m,t} \quad \forall i \in I, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (30)$$

$$x_{i,m,t} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (31)$$

$$s_{i,t} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T_0 \quad (32)$$

$$z_{i,m,t} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (33)$$

$$In_{i,t} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (34)$$

La función objetivo busca minimizar el incumplimiento total de la demanda. Como se indican en las restricciones (21) y (22) el stock para todo el portafolio de productos será el stock de inicio del mes, dado por la transacción de SAP que entrega dicha foto a la fecha, y el incumplimiento será el volumen en órdenes abiertas al comienzo del período también para cada uno de los productos.

La restricción (23) determina que el stock a fin de mes será resultado del stock al inicio del período, más el volumen a producir, menos la demanda del mes más la demanda neta del incumplimiento del producto en cuestión en ese período. El costo por incumplimiento es proporcional a la cantidad incumplida.

La restricción (24) especifica un máximo al volumen total a producir y representa límites la capacidad de producción, como pueden serlo la ocupación de maquinaria y envasadoras, restricciones del recurso humano, restricciones de rotación de materia prima de silos, etc. Por su parte, la restricción (25) especifica un máximo para el stock en depósito en cada período, dado por una limitación de carácter físico, ya que no podrá almacenarse más de lo que sus dimensiones lo indiquen. El stock total de almacenamiento suele trabajar en temporada alta con una ocupación del 80%, que permitirá ampliar dicha capacidad de requerirse. Al tratarse de una variable de stock la misma podrá tomar valores positivos. Además, las restricciones (26) y (27) expresan límites superiores e inferiores para el stock de cada producto en cada período.

Cabe destacar que los lotes de producción suelen programarse para minimizar el set-up de la envasadora, por lo que suelen tratarse de lotes que varían entre dos o más envasados. La asignación del tamaño de lote a fabricar es variable y flexible dentro de la célula de producción dedicada a cada familia de producto. La capacidad más grande por lote de producto está dada por una capacidad de 20.000 litros, donde suelen producirse volúmenes de alto volumen de venta y alta capacidad de rotación, generalmente, pinturas decorativas de color blanco a base agua. Dichas restricciones quedan mapeadas en las restricciones (28) y (29), que restringen la cantidad de lotes a fabricar por cada célula. Este cálculo es producto de la cantidad de días productivos por mes, las restricciones por paradas de mantenimiento, y la capacidad de los tanques.

Las restricciones (30) ligan las variables, para garantizar la consistencia de los valores que toman las variables. La variable *BigM* permite modelar restricciones lógicas activando o desactivando condiciones mediante variables binarias y asegura que en caso de haber producción esté dentro de un rango acotado, es decir, es utilizada para restringir el volumen de producción.

Finalmente, las restricciones (31) a (34) especifican la naturaleza de las variables.

Tabla 3. Capacidad de producción por célula

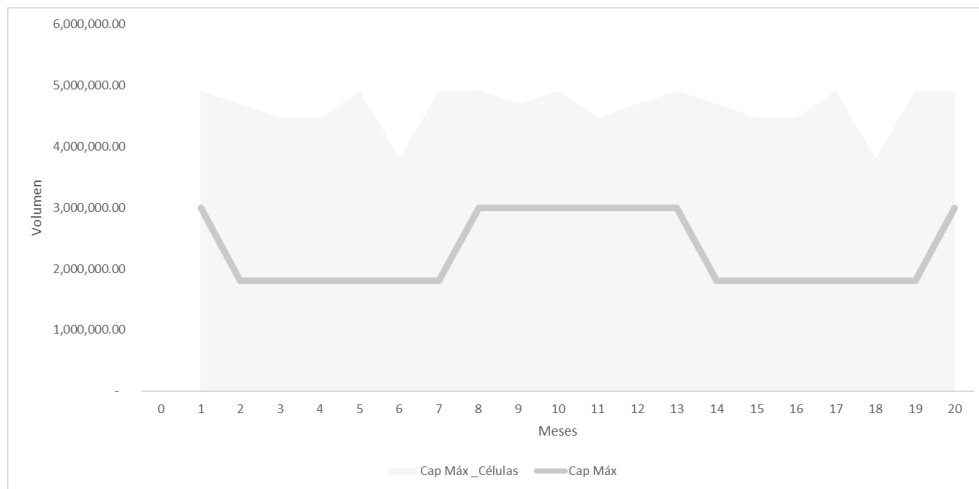
Célula	Código	Jan-24	Feb-24	Mar-24	Apr-24	May-24	Jun-24	Jul-24	Aug-24	Sep-24	Oct-24	Nov-24	Dec-24
Días productivos		22	21	20	20	22	17	22	22	21	22	20	21
Blancos	A	1,650,000	1,575,000	1,500,000	1,500,000	1,650,000	1,275,000	1,650,000	1,650,000	1,575,000	1,650,000	1,500,000	1,575,000
Tinting	B	880,000	840,000	800,000	800,000	880,000	680,000	880,000	880,000	840,000	880,000	800,000	840,000
Resto	C	2,200,000	2,100,000	2,000,000	2,000,000	2,200,000	1,700,000	2,200,000	2,200,000	2,100,000	2,200,000	2,000,000	2,100,000
Enduido	D	184,800	176,400	168,000	168,000	184,800	142,800	184,800	184,800	176,400	184,800	168,000	176,400

Célula	Código	Jan-25	Feb-25	Mar-25	Apr-25	May-25	Jun-25	Jul-25	Aug-25
Días productivos		22	21	20	20	22	17	22	22
Blancos	A	1,650,000	1,575,000	1,500,000	1,500,000	1,650,000	1,275,000	1,650,000	1,650,000
Tinting	B	880,000	840,000	800,000	800,000	880,000	680,000	880,000	880,000
Resto	C	2,200,000	2,100,000	2,000,000	2,000,000	2,200,000	1,700,000	2,200,000	2,200,000
Enduido	D	184,800	176,400	168,000	168,000	184,800	142,800	184,800	184,800

En la Tabla 3 queda evidenciado que las restricciones por célula son holgadas ya que la planta está dimensionada para incrementar su capacidad en caso de ser requerida, pero resulta necesario limitar la capacidad total de la planta dada la escala de demanda. Financieramente, y debido a la producción en escala, los límites mínimos y máximos de producción por mes son determinantes a la hora de planificar la producción. Esta evaluación financiera se realiza en forma mensual en el proceso de IBP como se ha mencionado anteriormente. Las decisiones para tomar dependiendo de los resultados del plan aprobado de producción serán la de incrementar turnos de producción, realizar horas extras, incorporar recursos de producción temporales, etc.

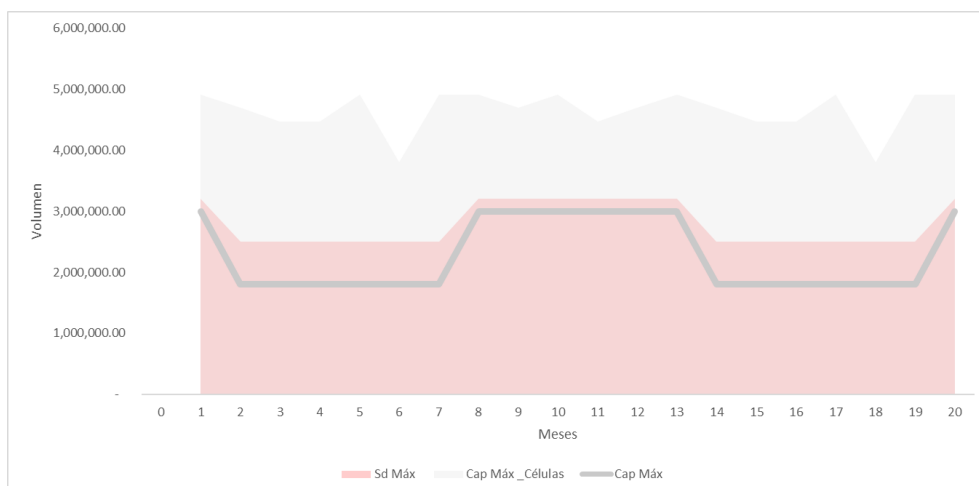
En la figura (9) queda demostrada la capacidad máxima, cota para la producción, vs la capacidad máxima para todas las células de producción. Queda evidenciado de esta forma que de requerir incrementarse la capacidad máxima de la planta es factible si incurrir en inversiones de aumentar la capacidad total de las células productivas.

Figura 10: Capacidad agregada por células de producción vs Capacidad por planta



Mientras las capacidades totales de producción máximas y mínimas se definen por la temporada alta y baja, la capacidad del depósito también se encuentra restringida por temporadas. Esta última se ajusta por la cantidad de operarios y los turnos asignados para realizar las tareas de almacenaje, picking, y delivery. El resultado es nuevamente ajustable y revisado en el proceso de IBP para el control de sus costos. En la compañía bajo estudio, los meses de alta temporada de producción se dan desde Agosto a Diciembre o Enero, y los de baja temporada de venta se dan en los meses de Febrero a Julio inclusive. Se puede apreciar, en la figura 10, cada una de las capacidades máximas descritas anteriormente en forma solapada.

Figura 11: Capacidades máximas de producción vs Stock máximo de almacenamiento



Las limitantes para las variables de stock de cada producto se determinan por la estrategia de Kanban, que tiene su nivel de stock mínimo, punto de reposición y stock máximo. Al tratarse de una estrategia “MTS”, SAP propondrá una orden de planeamiento (“plan order”)

en el punto de reposición. Como hemos definido un modelo que permite el incumplimiento, que es exactamente lo que acontece en la práctica, algunos stocks en algunos períodos no alcanzarán su stock máximo o quedarán con stock nulo. La revisión de dicha política es efectuada en forma semestral, en los meses de menor actividad para el sector de Planificación, y suele tratarse en los períodos de febrero y julio. Adicionalmente al stock máximo por producto, existe una restricción fija producto del espacio disponible en estanterías, por lo que el stock total de cada período jamás podrá superar la capacidad de almacenamiento del depósito de distribución.

Una vez establecido el plan de producción por producto se procede a realizar la programación diaria o scheduling, y de esta forma a emitir un nuevo día de producción.

Capítulo 4. Resultados

Describimos en este capítulo los resultados obtenidos con el modelo presentado en el capítulo anterior, sobre los datos de la empresa. El modelo es ejecutado en la consola mediante un archivo ZPL, y el Solver SCIP es quien resolverá el modelo mediante optimización para brindar una solución óptima, en caso de que la misma exista. Para mayor detalle de su sintaxis y expresiones básicas referimos a Gutiérrez, 2018. El tiempo de ejecución del modelo es de aproximadamente de 4 segundos (ver Figura 12), y los resultados son volcados a un archivo de texto, que luego mediante un proceso de transformación de datos se obtienen los resultados deseados.

Figura 12: Tiempos de resolución de SCIP

```
SCIP Status      : problem is solved [optimal solution found]
Solving Time (sec) : 4.00
Solving Nodes    : 1
Primal Bound     : +2.294364000000000e+06 (1 solutions)
Dual Bound       : +2.294364000000000e+06
Gap              : 0.00 %
```

A grandes rasgos, se puede observar que los tiempos de ejecución del modelo son considerablemente inferiores a los tiempos que le conlleva al área confeccionar el plan de producción en forma manual. Se estima que la tarea manual demora alrededor de ocho horas laborales, con la afectación de las restantes tareas diarias, mientras que el modelo ejecutado por SCIP y su transformación de datos, lleva en su totalidad un máximo de 15 minutos. Así mismo, la planificación que se ejecuta de forma manual no podrá contar con las ventajas de obtener varios escenarios productivos permitiendo de esta forma realizar la toma de decisión basada en datos. Queda demostrado que el modelo de optimización ejecutado puede procesar en tan sólo unos segundos, para un portafolio de 590 productos, y definir valores para sus cuatro variables de decisión $x_{i,m,t}$, $s_{i,t}$, $ln_{i,t}$, $z_{i,m,t}$ por producto, atendiendo seis restricciones por capacidad y almacenamiento.

Presentamos a continuación los resultados obtenidos al ejecutar el escenario aprobado en el proceso de IBP, es decir, el escenario de demanda y productivo con mayor probabilidad de ocurrencia, y en las secciones subsiguientes detallaré los resultados que son computados ante la variabilidad de parámetros productivos y diferentes escenarios de demanda.

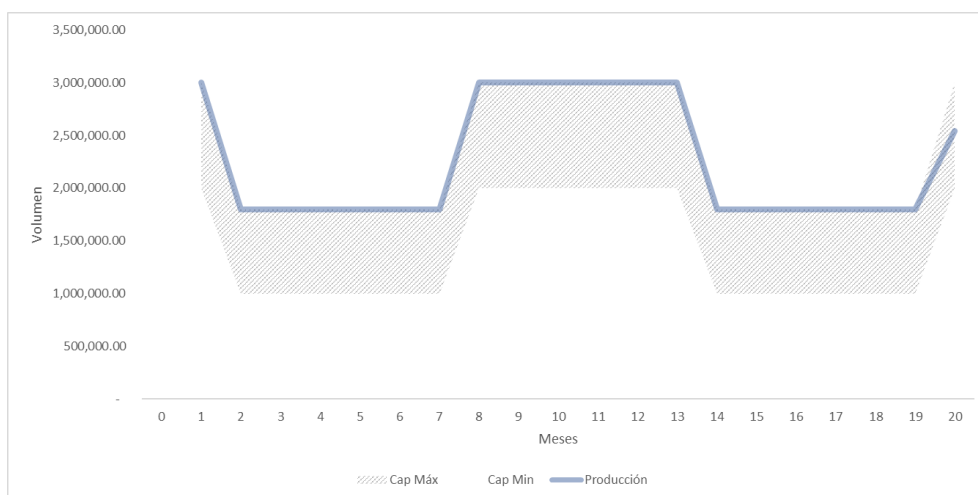
4.1 Escenario más probable

Utilizando la demanda aprobada por el directorio comercial en el proceso de IBP, es decir, el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia, y las restricciones de capacidad productiva, capacidad de almacenamiento y stocks máximos por producto se podrán observar los resultados que se detallan a continuación.

Si se agregan los datos para la obtención de la totalidad del portafolio, se puede observar en la Figura 13 que el modelo propone una utilización máxima de la capacidad productiva, es

decir, producirá todos los meses a la capacidad máxima, siendo esta una variable que exploraremos en profundidad para comprender cuán elástica será la variable de producción.

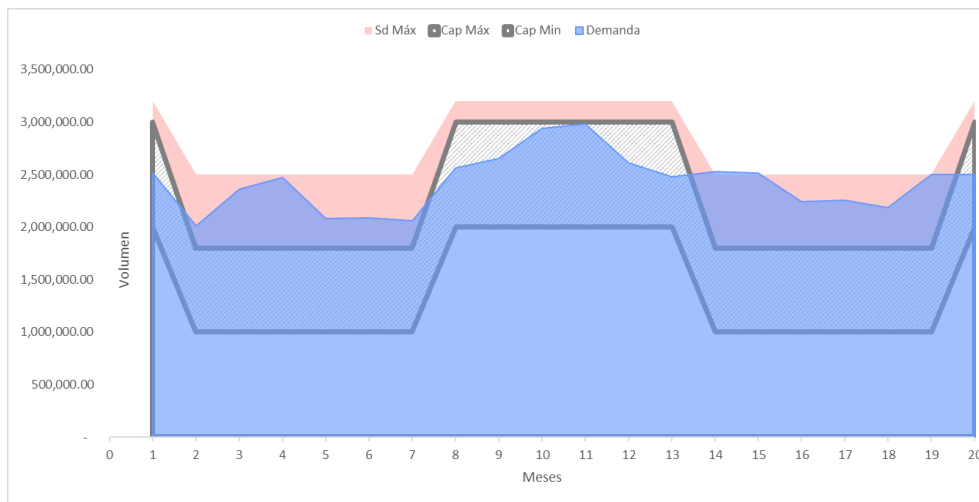
Figura 13: Producción agregada vs Capacidad máxima de producción



La producción mensual atenderá dos niveles, respondiendo a la capacidad máxima de baja temporada, que será de 1,8 millones de litros, y el segundo nivel, su capacidad máxima de alta temporada, que será de 3 millones de litros. Como puede apreciarse en la Figura 12, las capacidades reflejadas en el modelo acompañan de forma holgada los volúmenes de venta proyectados. Se observa que en los meses de Febrero a Julio la demanda superará la capacidad productiva, que resulta poco relevante para modelos que cuentan con una gestión de inventarios. Resulta oportuno destacar, que la capacidad instalada en planta tiene holgura y podrá ampliarse en caso de que su demanda lo requiera, mediante la contratación de mano de obra adicional.

A continuación, se puede valorar cómo el stock máximo de almacenamiento resulta también con capacidad restante, y esto se debe principalmente a que el depósito es un depósito dimensionado para atender demandas de mayor magnitud, y se trata a su vez de un depósito que es un activo de la compañía, por lo que los costos de almacenamiento están relacionados directamente con el costo del stock disponible al cierre.

Figura 14: Producción agregada vs Capacidad máxima vs Demanda



En la Figura 14 se reporta la distribución del stock en el período bajo análisis y es de notable atención que su curva es más pronunciada que la demanda y responde a un nuevo patrón de comportamiento. Esta curvatura se debe principalmente a que al estar la producción restringida con la capacidad máxima, no habrá disponibilidad en los meses previos a la temporada alta a generar niveles más elevados de stock, y en el recorrido para alcanzar la temporada alta, sólo restará producir lo máximo posible y consumir el stock disponible. Los niveles de stock luego van a recomponerse a partir del mes de Agosto. Este resultado, podría modelizarse si se corrigieran las capacidades productivas de alta y baja temporada. Entonces, el modelo a partir del mes de Julio, donde la demanda tiene pendiente positiva, producirá nuevamente la capacidad máxima, y los stocks se irán incrementando hasta alcanzar su pico máximo en el mes de Enero del año siguiente.

En cambio, el incumplimiento no superará el 5% de la demanda en casi todos los períodos, exceptuando los meses de Febrero, Marzo y Mayo de 2024, y Febrero, Marzo y Abril y Mayo de 2025. El análisis comienza con stocks muy bajos relativos a la demanda del mes de Enero, y es por esta razón que el incumplimiento del mes de Febrero llega a su pico máximo demostrando, que produciendo a su capacidad máxima no podrá responder tan rápidamente a las necesidades que refleja la demanda.

Figura 15: Producción agregada vs stock máximo de depósito

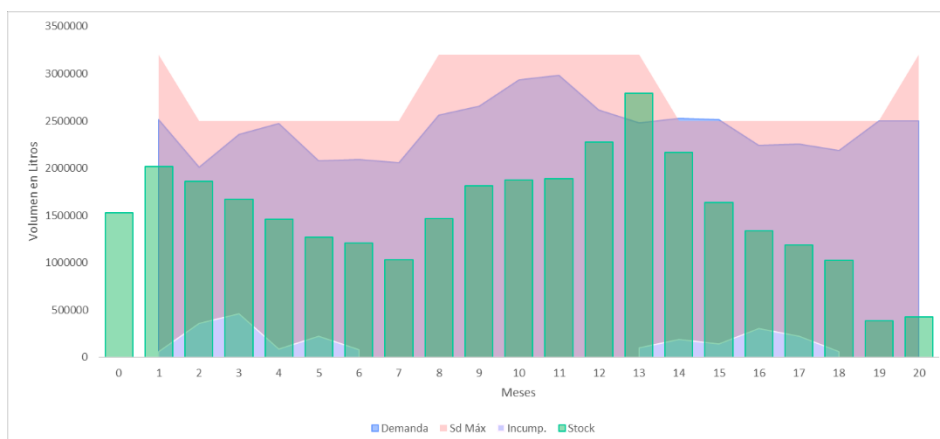


Tabla 4: Resultados escenario más probable

Período	Stock	Demanda	Incump.	Producción	Sd Máx	Cap Min	Cap Máx	Cap Máx _Células
0	1,530,163							
1	2,019,105	2,511,058	57,264	3,000,000	3200000	2000000	3000000	4914800
2	1,863,947	2,012,422	362,223	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4691400
3	1,668,293	2,357,877	461,223	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4468000
4	1,459,272	2,470,244	87,343	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4468000
5	1,269,147	2,077,468	226,749	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4914800
6	1,205,724	2,090,172	81,561	1,800,000	2500000	1000000	1800000	3797800
7	1,029,170	2,058,115		1,800,000	2500000	1000000	1800000	4914800
8	1,466,199	2,562,971		3,000,000	3200000	2000000	3000000	4914800
9	1,812,587	2,653,612		3,000,000	3200000	2000000	3000000	4691400
10	1,875,221	2,937,366		3,000,000	3200000	2000000	3000000	4914800
11	1,890,485	2,984,736		3,000,000	3200000	2000000	3000000	4468000
12	2,276,458	2,614,027		3,000,000	3200000	2000000	3000000	4691400
13	2,795,391	2,481,067	99,282	3,000,000	3200000	2000000	3000000	4914800
14	2,165,446	2,529,226	187,545	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4691400
15	1,637,133	2,515,855	144,788	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4468000
16	1,338,956	2,242,965	306,976	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4468000
17	1,191,067	2,254,868	220,291	1,800,000	2500000	1000000	1800000	4914800
18	1,026,951	2,184,407	59,119	1,800,000	2500000	1000000	1800000	3797800
19	383,871	2,502,199		1,800,000	2500000	1000000	1800000	4914800
20	425,798	2,503,001		2,544,929	3200000	2000000	3000000	4914800
Total	30,800,221	48,543,658	2,294,364	45,144,929	55,600,000	28,000,000	45,600,000	92,934,400

La Tabla 4 expone los resultados del modelo por período para la sumatoria de todos productos bajo estudio. Las principales variables de decisión que se detallan son: el stock, el incumplimiento y la producción, todas ellas en forma agregada por período. Tanto la demanda como las restricciones por capacidad de producción y almacenamiento son datos de entrada del modelo. El incumplimiento en el horizonte bajo análisis representa tan sólo el 4.35% de la demanda total, por lo que la empresa incurrirá en dicha pérdida. Es importante mencionar que los stocks se reducen drásticamente en los períodos 19 y 20, ya que el modelo no reconocerá que habrá que atender una demanda futura y por lo tanto no será necesario incrementar dicho stock.

El incumplimiento por mes, como se ha detallado en la Tabla 4, tiene un pico en el mes tres con un valor de 461 KLts, que se asemeja los incumplimientos en lo que incurre actualmente la compañía, acercándose a valores que puede alcanzar los 500KLts.

Tabla 5: Análisis escenario más probable

Estadísticas	Resultado [Litros]	Resultado [%]
Incumplimiento/Demanda		4.73%
Producción/Demanda		93.00%
Stock promedio mensual	1,666,142	
Stock promedio mensual/Demanda promedio mensual		69%
Stock promedio/ Stock máximo promedio		60%

En la tabla 5 se pueden observar las principales variables macro a revisar para la constatación de la robustez del modelo. Cobra sentido hacer foco en el stock promedio mensual y verificar que no alcance niveles desmedidos, como por ejemplo muy por encima de la demanda promedio. En este caso, rondará en 69%, lo cual resulta una escala económicamente viable para la organización. Por último, al obtener como resultado un incumplimiento que representa aproximadamente 2,3 millones de litros, y partiendo de 1,5 millones de litros de stock, el volumen a fabricar será inferior que la demanda estimada.

Para la validación del modelo, también se han revisado los resultados individuales por producto, y es por ello que tomaré como ejemplo un producto de clasificación tipo A, es decir, un producto con elevados volúmenes de venta y rotación y una gran contribución marginal, y otro producto, cuyo volumen de venta es muy bajo así como también su rotación. Llamaremos a ambos productos Producto 1, y 2 respectivamente.

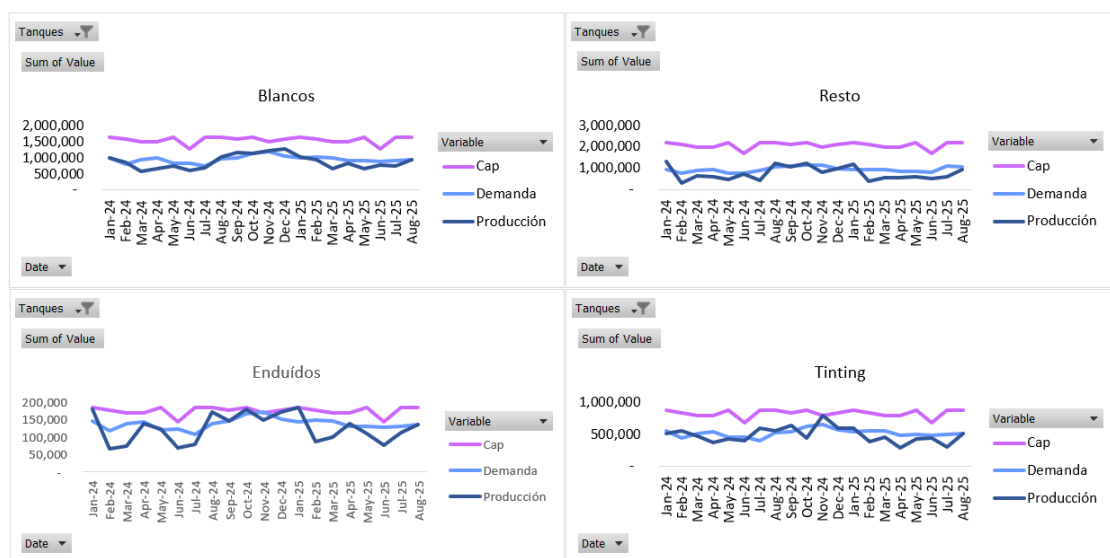
Como puede apreciarse en la Tabla 6, la distribución de la producción por célula de fabricación queda restringida por la capacidad de las mismas, resultando la suma de los volúmenes de cada célula limitada por la capacidad total de la planta.

Analizamos a continuación algunos aspectos relevantes de la solución obtenida. La Tabla 6 proporciona los volúmenes que se obtendrán en cada período por célula de producción, y cuya suma proporcionará la producción total mensual. Adicionalmente, en la Figura 15, queda evidenciado que el volumen a fabricar cumplirá con las restricciones de cada célula productiva, y que en su mayoría se comportará similar a su demanda.

Tabla 6: Distribución de la producción por célula de fabricación

Sum of Value	Column Labels				
Row Labels	A	B	C	D	Grand Total
1	1,006,287	507,910	1,306,790	179,013	3,000,000
2	867,197	559,956	306,591	66,256	1,800,000
3	589,076	477,168	659,339	74,417	1,800,000
4	671,256	379,433	610,510	138,801	1,800,000
5	755,877	426,276	493,601	124,246	1,800,000
6	607,047	397,479	726,489	68,985	1,800,000
7	679,285	601,221	440,232	79,262	1,800,000
8	1,031,409	561,000	1,236,489	171,102	3,000,000
9	1,165,379	640,080	1,048,262	146,279	3,000,000
10	1,134,493	448,725	1,237,109	179,673	3,000,000
11	1,223,168	800,000	827,253	149,579	3,000,000
12	1,269,683	596,437	962,106	171,774	3,000,000
13	1,020,041	593,722	1,202,806	183,431	3,000,000
14	946,460	391,207	374,484	87,849	1,800,000
15	677,576	458,098	563,876	100,450	1,800,000
16	824,320	294,164	542,866	138,650	1,800,000
17	669,062	428,388	593,087	109,463	1,800,000
18	777,043	447,323	498,622	77,012	1,800,000
19	762,099	305,023	620,975	111,903	1,800,000
20	938,464	511,288	959,331	135,846	2,544,929
Grand Total	17,615,222	9,824,898	15,210,818	2,493,991	45,144,929

Figura 16: Producción vs Capacidad máxima por célula



4.1 Escenario más probable para el Producto 1

El stock máximo para este producto está estratégicamente configurado en un valor muy bajo con relación a su demanda, y esto se debe principalmente a que es un producto con muy bajo tiempo de lead time de producción, con un proceso de muy baja complejidad y ocupación de equipos. Su volumen es tan significativo que los tanques son dedicados, y cuyo envasado suele programarse en una única capacidad, por lo que tampoco existe tiempo de setup. Se puede también observar que no hay incumplimientos, que los stocks se conservan en niveles bajos mientras que los niveles productivos son elevados (ver Figuras 15 y 16, y la Tabla 7).

Figura 17: Producción vs Stock máximo - Producto 1

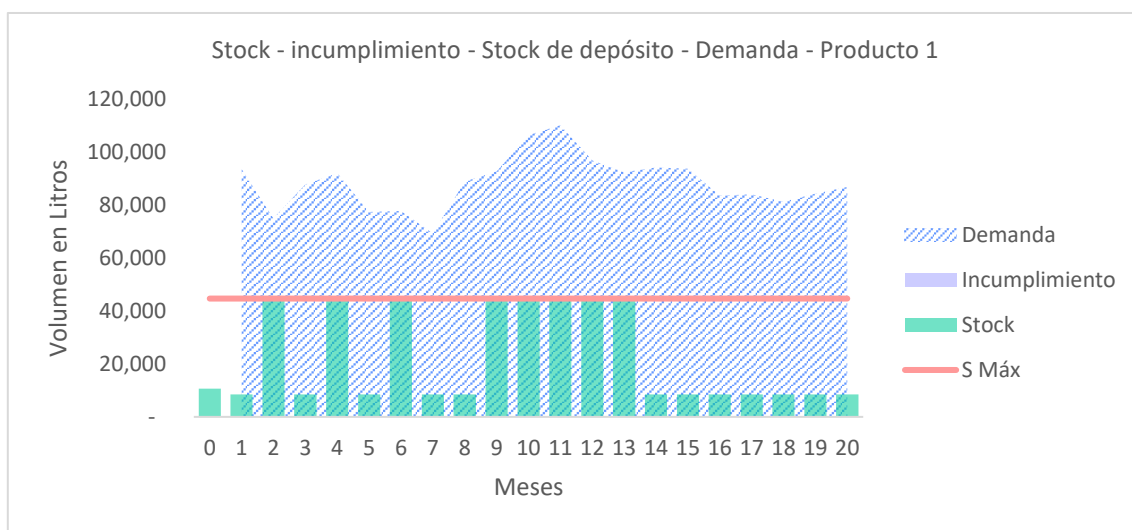


Figura 18: Stock - incumplimiento - Stock de depósito - Demanda

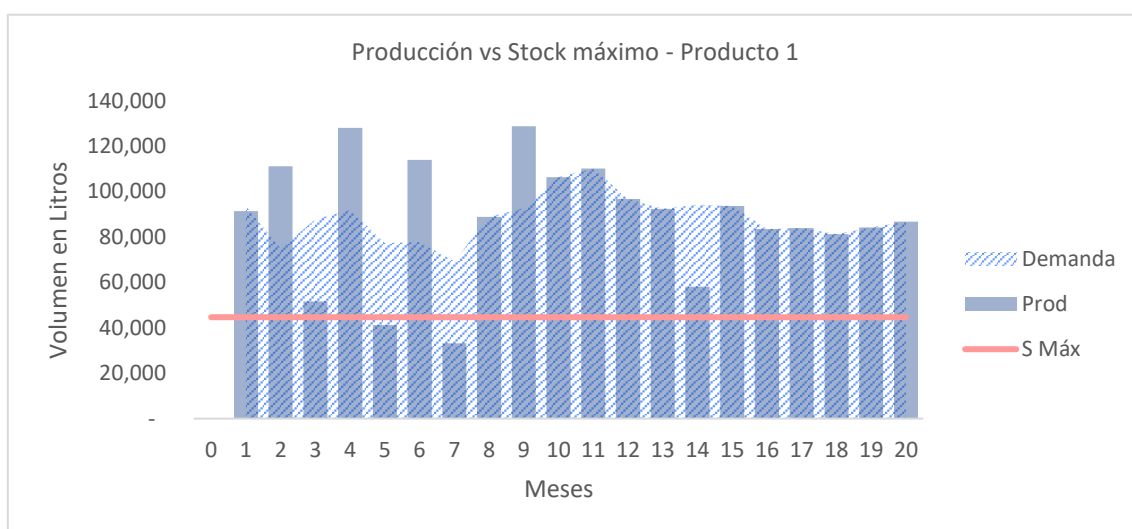


Tabla 7: Resultados producto 1

Período	Stock inicial	Stock final	Demanda	Incump.	Producción	Sd Máx
0						44,649
1	10,600	8,528	93,471		91,399	44,649
2	8,528	44,649	74,922		111,043	44,649
3	44,649	8,528	87,745		51,624	44,649
4	8,528	44,649	91,939		128,060	44,649
5	44,649	8,528	77,341		41,220	44,649
6	8,528	44,649	77,745		113,866	44,649
7	44,649	8,528	69,276		33,155	44,649
8	8,528	8,528	88,793		88,793	44,649
9	8,528	44,649	92,664		128,785	44,649
10	44,649	44,649	106,375		106,375	44,649
11	44,649	44,649	110,084		110,084	44,649
12	44,649	44,649	96,777		96,777	44,649
13	44,649	44,649	92,355		92,355	44,649
14	44,649	8,528	94,163		58,042	44,649
15	8,528	8,528	93,624		93,624	44,649
16	8,528	8,528	83,480		83,480	44,649
17	8,528	8,528	83,945		83,945	44,649
18	8,528	8,528	81,250		81,250	44,649
19	8,528	8,528	84,224		84,224	44,649
20	8,528	8,528	86,715		86,715	44,649
Total	461,600	459,528	1,766,888	-	1,764,816	892,974

La tabla 7 refleja los resultados obtenidos por el modelo y su estrategia de stocks máximos en su depósito.

4.2 Escenario más probable para Producto 2

Los resultados para este producto demuestran que, al comenzar con un nivel alto de stock y una demanda baja, la producción del mismo se dará sólo en seis meses no consecutivos. Este tipo de productos reflejan con claridad la estrategia de producción y su baja rotación. Es así también que el modelo no incurrirá en ningún incumplimiento (ver Figura 18) .

El perfil del stock como puede apreciarse en la Figura 17 tiene la característica de llegar a su valor de stock máximo, luego comienza a consumirse el mismo hasta el próximo lote de producción, bajando el mismo a niveles de stock mínimo.

Figura 19: Producción vs Stock máximo - Producto 2

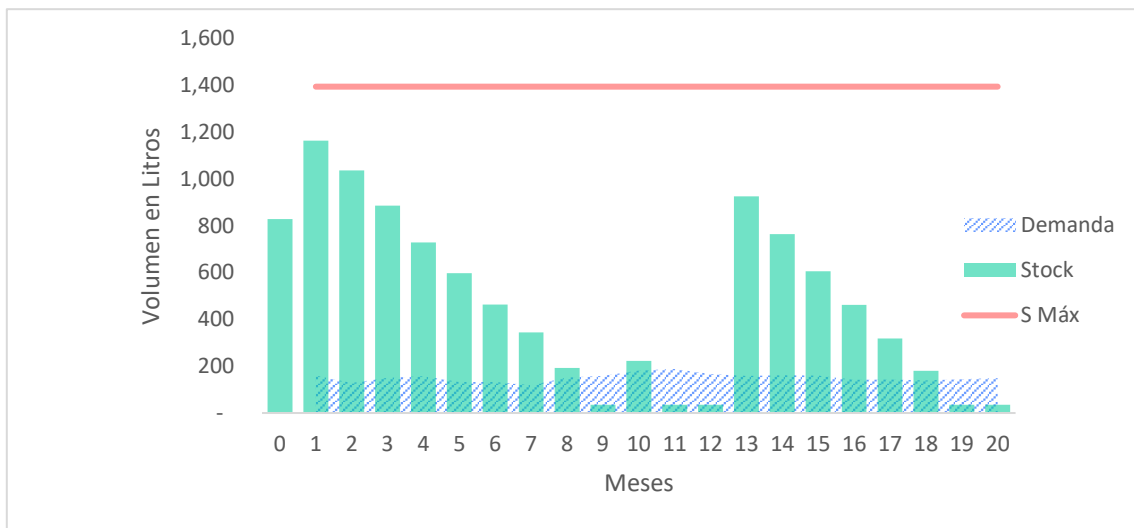
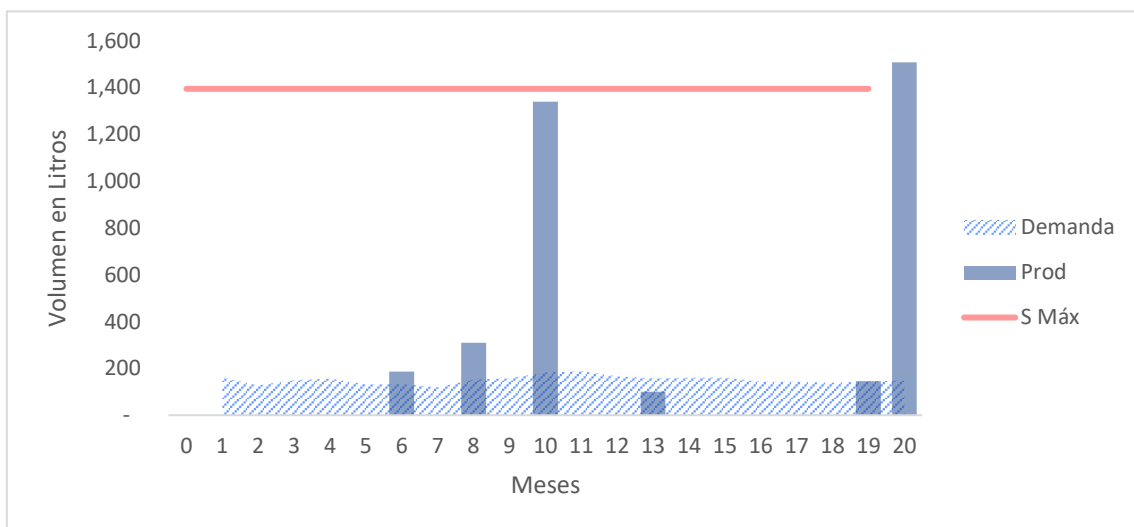


Figura 20: Producción vs Stock máximo - Producto 2



4.2 Análisis de sensibilidad con cambios en la capacidad de producción

Habiendo validado la robustez y precisión de los resultados del modelo, se detallará a continuación un escenario de sensibilidad, que cuenta con tres escenarios de capacidad productiva, para comprender el impacto de los resultados ante cambios en sus variables. Dichas variables son revisadas mensualmente y suelen variarse para correr diferentes escenarios de planificación y de esta forma tomar la decisión en función de su robustez.

En el primer análisis, se trabajan mayormente cambios de capacidad, tanto máxima como mínima y ambas están directamente relacionadas con la cantidad de horas de mano de obra por operario. Como puede observarse en la Tabla 8, estos primeros resultados no

contemplan cambios en la demanda y prácticamente tampoco habrá cambios en la capacidad de almacenamiento.

Tabla 8: Resultados análisis de sensibilidad

Row Label	Incumpl.	Producción Tot	Stocks	CapMax	CapMin	SdMax
1	2,294,364	45,144,929	32,330,384	45,600,000	28,000,000	55,600,000
2	6,794,364	40,663,654	30,750,471	40,800,000	28,000,000	55,600,000
3	2,208,090	45,789,642	33,320,174	46,900,000	22,300,000	57,600,000
Row Labels	Esc 1 vs Esc	Esc 1 vs Esc	Esc 1 vs Esc	Esc 1 vs Esc	Esc 1 vs Esc	Esc 1 vs Esc
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	296%	90%	95%	89%	100%	100%
3	96%	101%	103%	103%	80%	104%

Las variaciones detalladas son respecto al escenario 1, que he llamado al comienzo del capítulo, el escenario más probable se ven mapeadas en la Tabla 8. En dicha tabla se exponen las variables de decisión, stock, producción e incumplimiento acompañadas de las variables que he ajustado como lo son las capacidades máximas y mínimas de producción y el stock total de almacenamiento.

En el escenario 2 se ha disminuido en un 11% la capacidad máxima mientras que la capacidad mínima no ha sufrido cambio alguno, esto se traduce en reducciones de la capacidad total instalada en un 27%. Dicho ajuste implica un 10% de pérdida de producción en el horizonte bajo análisis, y un incremento sustancial en el incumplimiento, del 296%. Dicho escenario resulta poco favorable considerando que la compañía incurrirá en una pérdida de atendimento de demanda de unos 4.500.000 de litros adicionales respecto al escenario 1, y cuya suma representa más de un mes de venta.

En el escenario 3 el rango de capacidad se incrementa, en este caso en 24.600.000 de litros, pero esto no implica que vaya a producirse en todos los meses la capacidad máxima, de hecho, puede apreciarse que la producción aumenta tan sólo en un 1%, mientras que el incumplimiento se reduce a un 4%.

La toma de decisión sobre cuál escenario es conveniente producir estará basada además en la composición económica de la misma. Tomaremos dos variables para realizar el análisis, la facturación que estará dada por la siguiente ecuación:

$$Revenue_{(i,t)} = P_{i,t} * Q_{i,t} \quad (35)$$

Siendo $P_{i,t}$ el precio unitario por período y $Q_{i,t}$ la venta asociada de dicho producto.

Los costos de manufactura asociados a la fabricación son denominados “Costs of finished goods” y representan costos de materia prima y pack, mano de obra, y costos de manufactura.

Considerando el contexto inflacionario de Argentina, para la realización de la proyección de facturación y costos en pesos argentinos, se han considerado dos índices, la inflación en pesos y el índice de incremento de materia prima. Los mismos provienen de consultoras que proporcionan dichos datos a la compañía y que se detallan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9: Calendario de ajustes de precios y costos

Argentina												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Price calendar	5%		15%		15%		15%		15%		15%	
Raw material index	4%		15%		15%		15%		15%		15%	
Argentina												
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Price calendar	14%		12%		12%		15%		15%		15%	
Raw material index	14%		12%		12%		15%		15%		15%	

Por las actualizaciones realizadas en los períodos anteriores, el de aumento de precios y costos viene emparejado con un incremento del 188%, de esta forma los ajustes futuros irán acompañando la inflación hasta alcanzar la estimación proyectada de un 298% para el índice de precios y el 296% para el índice de costos (ver Tabla 10).

Tabla 10: Calendario de ajustes de precios y costos YTD-YTG

	Incrementos realizados	Promedio	Incrementos Totales
Price calendar	188%	110%	298%
Raw material index	188%	108%	296%

Producto de dicha actualización de precios y costos, se obtienen los resultados proyectados que se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11: Resultados escenarios

Escenario	Revenue	COGS	Total
1	207,363,664,687	(99,535,029,273)	107,828,635,414
2	190,642,765,225	(88,263,494,402)	102,379,270,823
3	190,554,847,748	(101,151,770,989)	89,403,076,759

Para la obtención de la facturación se ha estimado la demanda y se le ha removido el incumplimiento de la misma, de esta forma, se obtendrán tres escenarios de venta proyectada para cada escenario de producción.

Resulta interesante visualizar que el escenario 1 es aquel que tiene mejor contribución marginal, ya que si bien hay una menor producción en el escenario 2, el incumplimiento es tan significativo que la ganancia de las ventas cae en un 8%.

4.3 Análisis de sensibilidad con cambios en la demanda

En cada ciclo de IBP se analizan tres escenarios de Demanda, el escenario con mayor probabilidad de ocurrencia, el peor escenario y el mejor escenario y los mismos son trabajados y revisados con un horizonte anual. Todos ellos son calculados en base al escenario base, que parte del resultado estadístico, y los ajustes producto de variables exógenas, tales como el PBI, el índice de la construcción, la inflación, y la moneda, entre otros. Sobre dicha base ajustada, se incorporan las acciones de marketing y ventas, tales como nuevos lanzamientos, promociones, apertura de nuevos canales, etc. Ante de los riesgos u oportunidades mapeadas en casa escenario se establecen los escenarios, poco favorable o worst case scenario, y el más favorable, best case scenario.

Cabe destacar que a comienzos del ejercicio 2024, considerando la coyuntura económica de la Argentina, los mercados se encontraban expectantes de los nuevos anuncios de un nuevo gobierno de reciente asunción (diciembre de 2023). Los desafíos más significativos estaban dados por: una inflación elevada, una desaceleración en la actividad económica, una caída del consumo y dificultades en la industria, entre otros.

Las repercusiones de dicho pronóstico económico condujeron a los clientes de mayor envergadura a la compra anticipada de productos. Como consecuencia, sus niveles de stock se vieron aumentados en el ejercicio 2023 con el objetivo de comprar a precios inferiores a los proyectados, y postergar las decisiones de compra para tener una mejor visibilidad del consumo por parte del comprador en el año 2024.

Como consecuencia de dicho análisis de mercado a inicios del año 2024, la compañía proyectaba desafíos en cuanto a sostener una caída de volumen pequeña o menor respecto al año anterior, una estrategia de precios con el objetivo de sostener precios competitivos que se ajusten ante una proyectada inflación elevada, y una estrategia de elevar las ventas del portafolio de productos estándar vs productos de mayor calidad (premium). Los sucesivos pronósticos que se presentarán más adelante en el capítulo se verán impactados por dichas variables.

Los indicadores más relevantes para la compañía los cuales son revisados mensualmente se presentarán a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12: Indicadores 2024

Assumptions	Indicators	2023 Close	2024 IBP	2025 IBP
Argentina	Inflation - Average	133%	298%	120%
	Inflation - Year on year	209%	202%	50%
	GDP	-2.0%	-2.0%	4.0%
	RM Index BU Paints	-2.6%	2.3%	
	RM Index with FX effect	157%	296%	51%
	FX USD Dec	808	1605	2408
	FX trans. (vs USD average)	340	1317	2006
	Devaluation - Average	164%	287%	51%
	Paints Industry	0.5%		

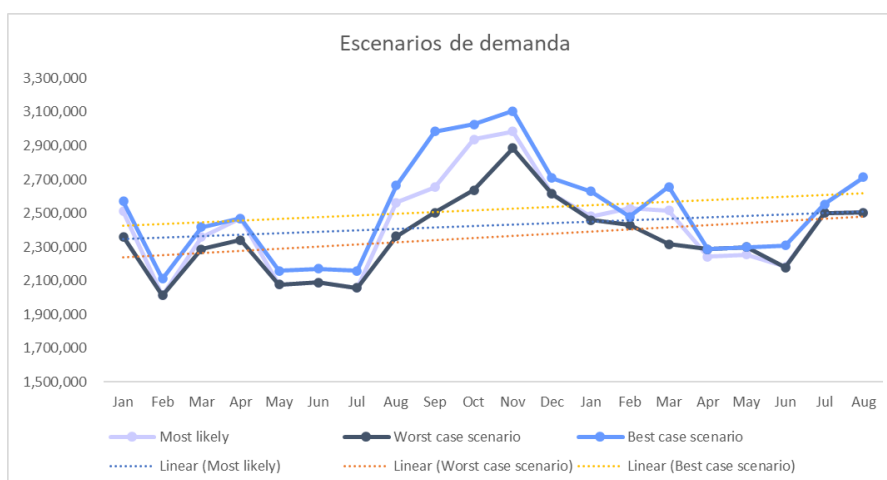
Como se ha descripto anteriormente se estima una inflación interanual en pesos del 298% y un aumento del costo de materia prima del 296%. El GDP o PBI refleja una caída del 2% que tendrá por consiguiente una caída en la compra de pintura para el consumidor final.

A continuación, se detallarán los escenarios mencionados, los cuales serán los volúmenes de entrada para el nuevo análisis de sensibilidad. Como se mencionó anteriormente, se hará foco en la demanda anualizada, y no en el conjunto de períodos de 20 meses.

En cada escenario analizado, se han evaluado los riesgos y las oportunidades de los objetivos asociados al sector de ventas y marketing, tales como promociones, lanzamientos, apertura de nuevos locales, etc. Cada acción conlleva una probabilidad de ocurrencia asociada cuya performance es medida en cada ciclo de IBP.

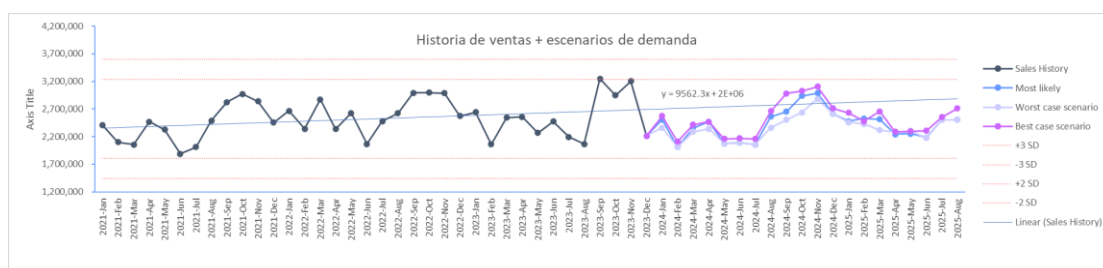
El perfil de los tres escenarios de demanda puede visualizarse en la Figura 20.

Figura 21: Perfil de demanda para los tres escenarios



Puede observarse que para los tres casos existe una tendencia lineal de carácter positiva, y que refleja en consecuencia la tendencia de la historia de ventas. Cabe destacar además que todo el volumen proyectado para cada escenario se encuentra dentro de los límites de control, dados por tres y dos desvíos estándar como queda mapeado en la Figura 21.

Figura 22: Proyección de demanda para los tres escenarios



Los primeros dos cuartos del año no representan mayor volatilidad entre ellos, presentan tan sólo una diferencia muy pequeña en litros, mientras que el segundo semestre, expone mayor variación entre ellos. Se puede observar que el mejor escenario propone una estacionalidad más pronunciada y una temporada alta más agresiva que los otros escenarios. Debido a la incertidumbre que presenta el año comercial, luego de la asunción de una nueva presidencia, existe mucha incertidumbre respecto al mercado, y recordemos que la pintura no es un elemento esencial, y que los análisis macroeconómicos y de mercado proponen recesión, caída en los salarios, caída del índice de la construcción, entre otros. Como se muestra en la Tabla 13, 2023 fue un año de 30.4 millones de litros, y tanto su escenario Most likely como el Worst Case representan caídas vs su año anterior. Sólo el pronóstico Best Case crecerá en menos del 0.5%.

Tabla 13: Escenarios vs 2023

Month	Tot. Sales History Y-3	Tot. Sales History Y-2	Tot. Sales History Y-1	Most likely	Worst case scenario	Best case scenario
2024	28,832,424	31,563,894	30,415,704	29,330,068	28,230,068	30,545,068
2024 vs PY				-3.57%	-7.19%	0.43%

A continuación, se detalla cada escenario proyectado y se presentan los resultados arrojados por el modelo en cada uno.

4.3.1 Escenario más probable

En el escenario más probable, y al tratarse de un año que se espera recesión en la compra de pintura, se trata de un escenario conservador, donde se ve reflejada una estacionalidad muy pronunciada, y un pico de demanda marcada en el cuarto trimestre. Como puede observarse en la Figura 22 y su Tabla 14, la proyección demuestra que en el año, la demanda representa un crecimiento vs Y-3, pero una caída vs Y-2 y Y-1. La demanda más alta es

trasladada a los últimos tres meses del año, ya que se espera un repunte en los salarios, una mayor desaceleración de la inflación y un crecimiento en la construcción.

Figura 23: Historia de ventas + Escenario más probable

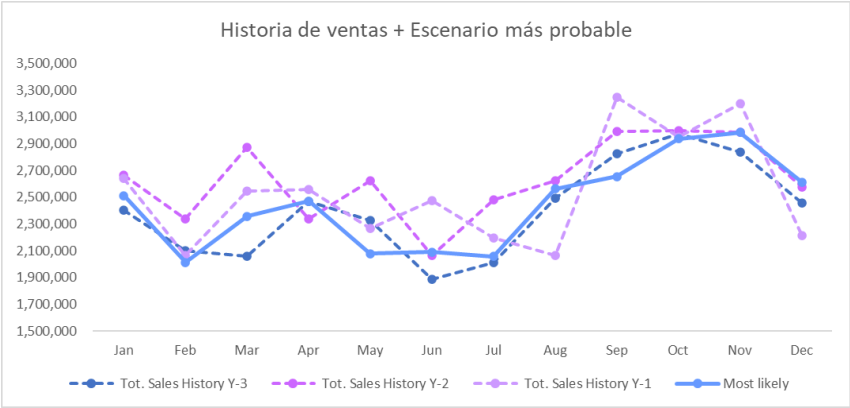


Tabla 14: Comparativa Escenario más probable vs años anteriores (trimestre)

ML	ML vs Y-3	ML vs Y-2	ML vs Y-1
Q1	4.9%	-12.7%	-5.1%
Q2	-0.6%	-5.6%	-9.0%
Q3	-3.1%	11.3%	-3.1%
Q4	3.3%	0.3%	2.1%
FY	1.7%	-7.1%	-3.6%

4.3.2 Escenario menos favorable

El segundo escenario es de carácter pesimista o poco favorable, que muestra tener una estacionalidad suavizada y menos pronunciada (ver Figura 23), y consecuentemente volúmenes más próximos a una media. Representa una profunda caída de aproximadamente 3,1 millones de litros respecto a Y-2. La venta más alta se espera en noviembre, pero continúa siendo inferior a los dos años anteriores.

Figura 24: Historia de ventas y escenario poco favorable

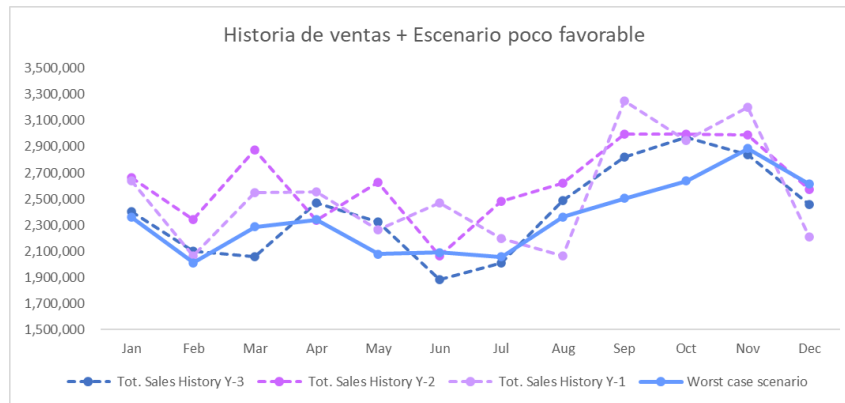


Tabla 15: Comparativa Escenario poco favorable vs años anteriores (trimestre)

WC	WC vs Y-3	WC vs Y-2	WC vs Y-1
Q1	1.5%	-15.5%	-5.5%
Q2	-2.6%	-7.4%	-1.6%
Q3	-5.5%	-14.5%	3.7%
Q4	-5.5%	-4.9%	3.7%
FY	-2.1%	-10.6%	-7.2%

Por último, si observamos la distribución de volúmenes por trimestre en la Tabla 16, se ve detallado que los tres escenarios contienen el 29% de su volumen anualizado en el cuarto trimestre. Los tres primeros trimestres varían entre ellos en un 1%, es decir, siguen una estacionalidad similar entre ellos.

Tabla 16: Comparativa Escenario poco favorable vs años anteriores (trimestre)

Variable	Q1	Q2	Q3	Q4
Tot. Sales History Y-3	23%	23%	25%	29%
Tot. Sales History Y-2	25%	22%	26%	27%
Tot. Sales History Y-1	24%	24%	25%	27%
Most likely	23%	23%	25%	29%
Worst case scenario	24%	23%	25%	29%
Best case scenario	23%	22%	26%	29%

A continuación, se detallan los resultados de esta nueva proyección de demanda. En la Tabla 17, se pueden observar los resultados del modelado para dicho escenario, y seguidamente su distribución de stock en la Figura 24. Nuevamente, los resultados son agrupados para validar los resultados obtenidos en la Tabla 18.

Tabla 17: Resultados escenario menos favorable

Período	Stock	Demanda	Incump.	Producción	Sd Máx
0	1,530,163				
1	2,169,099	2,361,058	64,785	3,000,000	3200000
2	2,021,462	2,012,422	133,831	1,800,000	2500000
3	1,667,419	2,287,877	144,501	1,800,000	2500000
4	1,271,678	2,340,244	84,887	1,800,000	2500000
5	1,079,097	2,077,468	25,316	1,800,000	2500000
6	814,241	2,090,172		1,800,000	2500000
7	556,126	2,058,115		1,800,000	2500000
8	1,193,146	2,362,971		3,000,000	3200000
9	1,689,533	2,503,612		3,000,000	3200000
10	2,052,160	2,637,366		3,000,000	3200000
11	2,167,415	2,884,736		3,000,000	3200000
12	2,553,388	2,614,027		3,000,000	3200000
Total	19,234,764	28,230,068	453,320	28,800,000	34,200,000

Figura 25: Stock - incumplimiento - Stock de depósito - Demanda

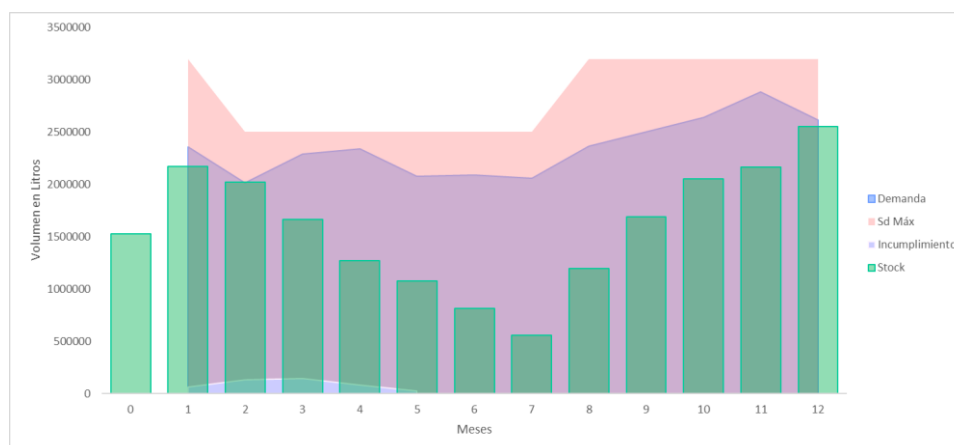


Tabla 18: Análisis escenario menos favorable

Estadísticas	Resultados WC [Litros]	Resultados WC [%]	Resultados ML [Litros]	Resultados ML [%]
Incumplimiento/Demanda		1.61%		4%
Producción/Demanda		102%		98%
Stock promedio mensual	1,602,897		1,652,967	0%
Stock promedio mensual/Demanda promedio mensual		68%		68%
Stock promedio/ Stock máximo promedio		56%		58%

La relación del cumplimiento, al comparar el escenario más probable vs el escenario menos favorable, demuestra que su ratio se reduce significativamente a un 1.61%, es decir, propone un mejor atendimento de la demanda.

El modelo nuevamente se verá ajustado a la capacidad de producción máxima, de forma tal de minimizar el incumplimiento, por lo que se puede observar que no hay cambios en los volúmenes totales de producción. La caída, sin embargo, se ve reflejada en los stocks mensuales cuyo valor es de -2.81%. La caída de la demanda demuestra ser más agresiva que dicha caída en los stocks.

Por último, al reducirse la demanda y permanecer los volúmenes productivos, el modelo presentará un incremento en la cantidad producida vs dicha demanda.

4.3.3 Escenario más favorable

Por último, detallamos a continuación los resultados del tercer y último escenario de demanda, el más favorable. Este escenario tiene una caída en el segundo trimestre respecto a los años anteriores por la esperada recesión, que afecta principalmente al índice de la construcción, y a su vez por la incertidumbre que manejan dichos mercados. Nuevamente, se espera un fuerte crecimiento en el cuarto trimestre, superando los tres años anteriores, y una mayor demanda volcada a los último dos trimestres como puede valorarse en la Tabla 16, un 26% y 29% respectivamente. Dicho escenario tiene tan sólo 0,48 millones de litros menos que el año anterior.

La nueva demanda proyectada acompaña la estacionalidad de los años anteriores como se muestra en la Figura 25, y la distribución de sus cuatrimestres en la Tabla 19.

Figura 26: Historia de ventas y escenario más favorable

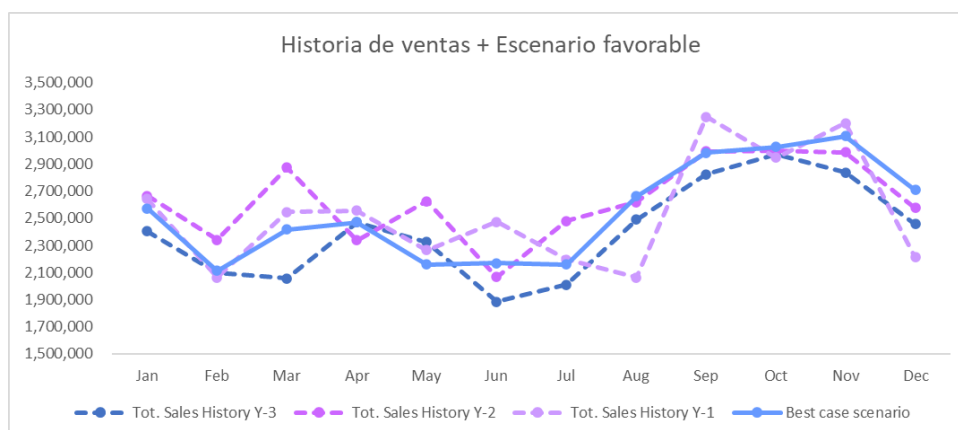


Tabla 19: Comparativa Escenario favorable vs años anteriores (trimestre)

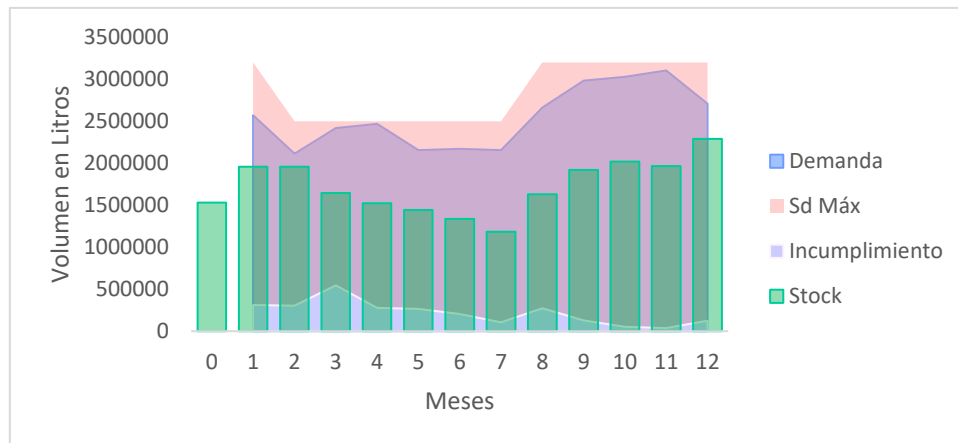
BC	BC vs Y-3	BC vs Y-2	BC vs Y-1
Q1	8.3%	-9.9%	-2.1%
Q2	1.8%	-3.3%	-6.8%
Q3	6.5%	-3.6%	4.0%
Q4	7.0%	3.3%	5.7%
FY	5.9%	-3.2%	0.4%

Por último, los resultados agregados para el tercer escenario se detallan a continuación en la Tabla 20 seguidamente de su distribución de stocks en la Figura 26.

Tabla 20: Resultados escenario más favorable

Período	Stock	Demanda	Incumplimiento	Producción
0	1530163			
1	1959108	2571058	313173	3000000
2	1959861	2112422	305020	1800000
3	1647006	2417877	546287	1800000
4	1523049	2470244	279082	1800000
5	1444655	2157468	264043	1800000
6	1338524	2170172	205036	1800000
7	1185432	2158115	106168	1800000
8	1628634	2662971	273416	3000000
9	1918436	2983612	126856	3000000
10	2017926	3027366	51026	3000000
11	1964216	3104736	36138	3000000
12	2291325	2709027	126355	3000000
Total	20,878,172	30,545,068	2,632,600	28,800,000

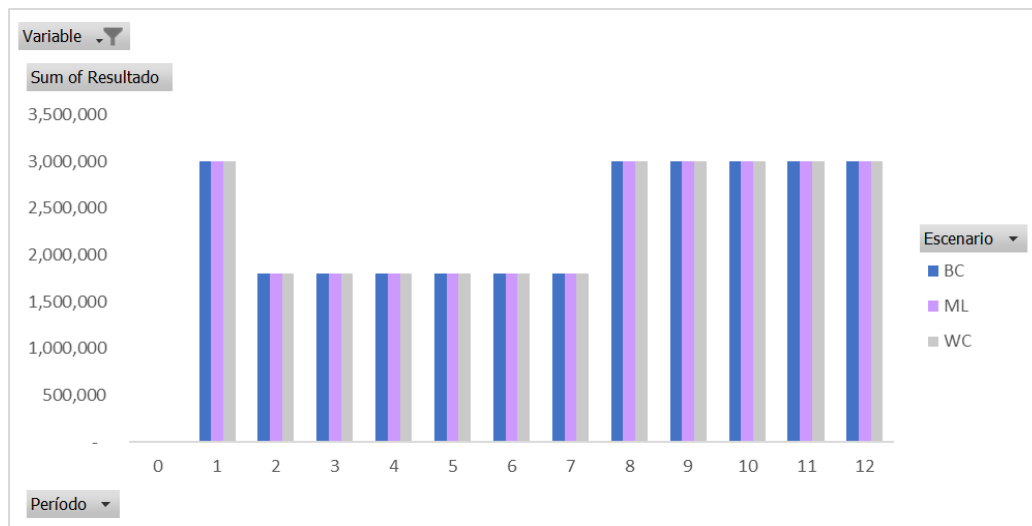
Figura 27: Stock - incumplimiento - Stock de depósito - Demanda



4.4 Comparativa escenarios de demanda

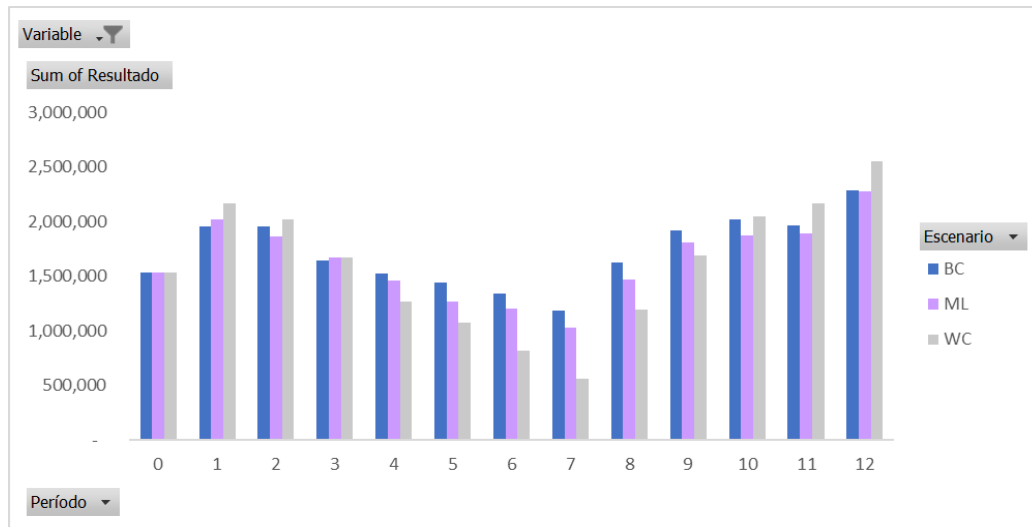
Para finalizar, si observamos los planes de producción, es fácilmente visible que tanto el escenario más probable como el mejor escenario producirán todos los meses hasta alcanzar la capacidad máxima. Es decir, como primera afirmación, la variable de producción no será sensible ante los cambios de demanda (Ver Figura 27).

Figura 28: Tres escenarios productivos



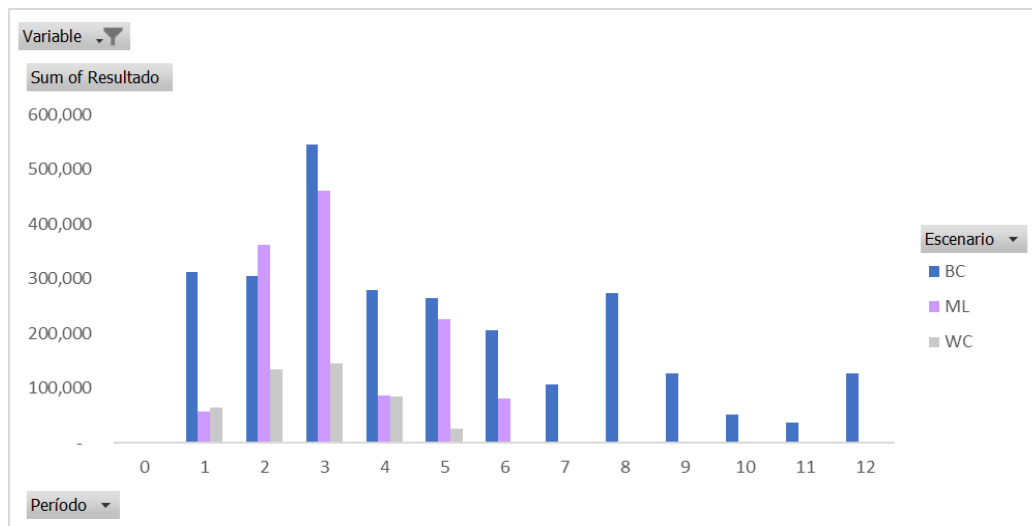
Si analizamos el stock, en la Figura 28, como consecuencia de sostener los niveles productivos, resulta visible que la distribución para los tres escenarios sugiere el mismo patrón de comportamiento, pero atendiendo diferentes niveles. Ante el escenario más probable, el stock total será un 4.88% superior al escenario más probable, mientras que el escenario poco favorable reducirá sus stocks en -2.81%.

Figura 29: Tres escenarios de stock



Lo comentado anteriormente ha de entenderse con mayor precisión al observar el comportamiento del incumplimiento. En los tres casos la minimización del incumplimiento varía sustancialmente, con un valor de aproximadamente 0.5 millones para el peor escenario, y uno de 2,6 millones para el mejor escenario. Es por ello, que el mejor escenario tendrá menos disponibilidad de stock que el escenario más probable (Ver Figura 29).

Figura 30: Tres escenarios de incumplimiento



Capítulo 5. Conclusiones

El presente trabajo presenta un modelo productivo que busca responder a diferentes necesidades de negocio para reducir los tiempos operativos y tomar decisiones en base a modelos de optimización. Dicho modelo cuenta con la flexibilidad de proyectar diferentes escenarios productivos y consecuentemente tomar decisiones basadas en datos.

Los tiempos de ejecución de los resultados y transformación de datos se ven drásticamente reducidos con el modelo propuesto, así como también el armado de los diferentes escenarios. Este último paso resulta no menor en las áreas de planificación, puesto que parten de supuestos y pronósticos que pueden verse constantemente afectados por las variables macro y microeconómicas. En el primer análisis de sensibilidad, se han ajustado variables productivas tales como capacidades máximas y mínimas de producción, mientras que en el segundo análisis se ha variado la demanda proyectada.

En el primer enfoque, como se mencionó anteriormente, la capacidad productiva es ajustada para modelizar diferentes escenarios, puesto que en la práctica dicha capacidad puede ser ajustada mayormente, por la cantidad de turnos de producción, la cantidad de operarios y la planificación de las paradas de mantenimiento, entre otras. Considerando que el costo asociado no se encuentra dentro del modelo de optimización, cada escenario se ha costado con el objetivo de ser una variable más para la toma de decisión final. Adicionalmente, el segundo análisis aborda diferentes escenarios de demanda, y de esta forma anticipar algunos cambios que deban realizarse en la cadena antes de que ocurran. La evaluación de la optimalidad en el nuevo proceso podrá evaluarse con los indicadores de OTIF y DOH como se ha descrito en el capítulo 1.

Para la confiabilidad del modelo, se ha sugerido a la compañía correr el proceso actual en paralelo con el nuevo de forma tal de evaluar las mejoras y comparar los resultados entre ambos. De esta forma no sólo se valida su mejora, sino que también provee mayor confianza a los equipos involucrados.

Mediante el ejercicio de modelización, el modelo final presentado ha demostrado ser flexible a la hora de incorporar nuevas restricciones, pero cabe destacar que la incorporación de nuevas restricciones puede traer aparejado la posibilidad de no hallar la solución óptima.

Los principales puntos hallados para mejorar dicho modelado consisten en aplicar una restricción que favorezca el redondeo de la cantidad de latas por pallets, que luego son trasladados al centro de distribución, obtener una mejora automatización entre el usuario, la transformación de datos y el resultado final. Para esta segunda mejora, sería recomendable un software donde sea factible seleccionar los modelos a correr y donde se puedan ir corrigiendo los parámetros y sus restricciones.

Bibliografía

A. Drexl (1997). Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research* 99-2, pp. 221-235.

A. Gharaei (2020). Joint Economic Lot-sizing in multi-product level Integrated Supply Chains: Generalized Benders Decomposition. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* Volume 7-4, pp. 309-325.

Association for Supply Chain Management. (2019). *CPIM, Certified in Production and Inventory Management* (Version 6.1 ed., Vol. 1).

F. Gutiérrez (2018). Introducción a SCIP y ZIMPL. Apunte de la asignatura *Investigación Operativa*. FCEyN, Universidad de Buenos Aires.

R. Jans (2006). Modeling Industrial Lot sizing Problems: A Review. *International Journal of Production Research* 46-6, pp. 1619-1643.

O. Rivero. (2016). El Método de Pronóstico Holt-Winters 12. Universidad Privada del Norte, Perú.

R. Viveros y E. Salazar (2010). Modelo de planificación de Producción para un sistema multiproducto con múltiples líneas de producción. *Ingeniería de Sistemas* 24, pp. 89-102.

Athanasopoulos, R. J. (2025, March 3). *Forecasting: Principles and Practice*. Melbourne, Australia.