



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe Entrega 3

Combatiendo el desperdicio de alimentos en un supermercado

Grupo 13

Domingo Agüero Ureta 20638388 sección 5
María Angélica Gazitúa 20638442 sección 1
Joaquin Güell Moreno 2063885J sección 5
María Bloomfield Joannon 20644272 sección 2
Olivia Irarrázabal Pavez 20641664 sección 2
Emilia Silva Vicuña 20639740 sección 1

Fecha entrega: 22 de junio de 2022

Índice

1. Descripción y elección del problema	3
2. Modelo de Optimización de cantidad de alimento desperdiciado por un supermercado	6
2.1. Subíndices y conjuntos	6
2.2. Parámetros	6
2.3. Variables	6
2.4. Función Objetivo	7
2.5. Supuestos	7
2.6. Restricciones	7
3. Datos	9
4. Resultados	9
5. Análisis de Sensibilidad	10
5.1. Análisis variación de pedidos máximos a la semana	10
5.2. Análisis variación de demanda para cada producto	11
5.3. Análisis variación de capacidad de bodega	12
5.4. Análisis variación de mínima cantidad que se puede pedir para cada producto	12
5.5. Análisis crítico de restricciones activas	13
6. Conclusiones	14
7. Referencias Bibliográficas	16

1. Descripción y elección del problema

La última década del siglo XXI ha estado marcada fuertemente por el impacto del calentamiento global y los alcances que este puede tener a corto plazo. El crecimiento acelerado de la población y la industrialización han dejado cambios irreversibles en el ambiente. Es probable que el mundo se caliente más de 3°C por encima del clima preindustrial si no se asumen más compromisos y medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Incluso con los actuales compromisos implementados, hay aproximadamente un 20 % de probabilidad de superar los 4°C para el año 2100, generando efectos como el aumento del nivel del mar, sequía, temperaturas extremas, acidificación del océano, entre otros (World Bank, 2012). Esto genera un riesgo para los sistemas de soporte humanos relacionados con la alimentación, el agua y los ecosistemas, y deja en evidencia la vulnerabilidad del mundo.

El sector energético es la fuente principal de emisiones de gases invernadero y es donde se han concentrado la mayor parte de los esfuerzos de los países. No obstante, datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación indican que los sistemas alimentarios del mundo son responsables de más de un tercio de las emisiones antropogénicas. Aproximadamente, 18 billones de toneladas de dióxido de carbono son generados en este sector, abarcando desde el uso de la tierra y la producción agrícola hasta el embalaje y la gestión de residuos (FAO, 2021).

Uno de los principales problemas que aquejan actualmente a la industria alimentaria es el desperdicio de alimentos. El desperdicio de alimentos tiene “relación con la disminución de alimentos, aptos para el consumo humano, que ocurre al final de la cadena alimentaria (ventas y consumo final), es decir, cuando los alimentos se pierden por malas decisiones de los comerciantes y consumidores.” (ODEPA, 2019) Esto se da en toda la industria alimentaria, ya sea dentro de los hogares, restaurantes, supermercados, centros de distribución de alimentos, entre otros. Según la FAO, alrededor del mundo se desperdicia aproximadamente un tercio de todos los alimentos producidos. Esto no es solamente comida que podría haberse aprovechado en localidades más necesitadas, sino que también es un desperdicio de recursos naturales, los cuales fueron utilizados para producir estos alimentos (EARTH, 2022). Este conflicto es, en parte, fruto de un mal manejo y organización en el consumo, compra y venta de los productos, por parte de todos aquellos que pertenecen a la industria alimentaria.

El desperdicio de alimentos es un problema a nivel mundial y tiene múltiples consecuencias a nivel económico, social y medioambiental. En el ámbito económico, el desperdicio de comida genera que los productores ganen menos dinero al no estar vendiendo todo lo producido y, a su vez, que los precios de los alimentos sean mayores (FAO, 2022). Además, si el desperdicio es menor, el costo de producción también sería menor al ser un proceso más eficiente. (BBC, 2021) Es decir, este problema perjudica tanto a los productores como consumidores. El impacto social también es de gran envergadura, ya que una parte considerable de los alimentos producidos son desperdiciados aún cuando mueren miles de personas por esto diariamente. Según las Naciones Unidas, 24.000 personas mueren de hambre cada día, lo que equivale al 16 % de todas las muertes en el mundo cada día (DW, 2022). Por otro lado, la FAO calcula que la comida desperdiciada podría alimentar a 2000 millones de personas.

En términos medioambientales, se desperdicia toda la energía y agua que se utiliza para producir, transportar y envasar aquellos alimentos que no fueron consumidos. Según la ONU, el desperdicio de comida es responsable entre un 8 y 10 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Además, si estos alimentos terminan en el vertedero, se pudren y liberan metano (WWF, 2022). Este es un gas de efecto invernadero que, según el investigador Euen Nisbet, es “muy fuerte, mucho más fuerte que el CO₂” (Forbes, 2019).

Debido a los grandes impactos generados por el desperdicio de comida y a todas las cifras mencionadas previamente, es evidente que se requiere minimizar la cantidad de comida perdida para

que los precios de los alimentos producidos disminuyan, siendo más accesibles y a su vez, se emitan menos gases de efecto invernadero.

Un supermercado promedio almacena 28.112 artículos, de los cuales un tercio termina en los vertederos. La organización ReFED, dedicada a terminar la pérdida y desperdicio de comida a lo largo de Estados Unidos, estimó que los supermercados minoristas generan 10,5 millones de toneladas de desperdicios de alimentos. “Si bien [los supermercados] no son la porción más grande en el pastel del desperdicio de alimentos, sigue siendo importante porque estos minoristas manejan una gran cantidad de alimentos”, dice Dana Gunders, directora ejecutiva de ReFED (FootPrint, 2021).

Elena Bulmer, co-autora del estudio “*El problema del desperdicio de comida. Un análisis crítico*” publicado por EAE Business School indicó que:

En los países desarrollados, la mayor parte de la comida se pierde en la última fase de la cadena de suministro. Se ha identificado una interrelación supermercado-consumidor final. Un supermercado, con independencia de su tamaño, genera una gran cantidad de residuos, tanto por su tipo de actividad como por la variedad de inventario que mantienen, y la necesidad de evitar el coste de imagen que producen los productos agotados. En un día de trabajo se deben gestionar residuos orgánicos, plástico, cartones, vidrio, latas y bidones. Los supermercados tienen un gran impacto sobre los desechos de alimentos, debido a los cambios sobre lo que significan las fechas para la seguridad alimentaria, que hace que se deseche una gran cantidad de alimentos comestibles.

(Bulmer, 2021, como se citó en Financial Food, 2021)

Por las razones anteriores decidimos centrarnos específicamente en minimizar los desperdicios de alimentos de un supermercado en particular. Para cumplir lo anterior se plantea el siguiente modelo de optimización:

Un supermercado quiere ser más sustentable mediante la minimización de alimentos que se venen en un horizonte de T días. El supermercado tiene un conjunto P de productos, los cuales se dividen en tres categorías $q \in \{C, R, A\}$ según las condiciones que necesitan los productos al ser almacenados. Cada producto puede ser congelado $C \subseteq P$, refrigerado $R \subseteq P$ o almacenado a temperatura ambiente $A \subseteq P$. Además, cada producto se vence en $e \in \{1, \dots, T\}$ días.

Para lograr este objetivo, el modelo ayudará al supermercado a decidir qué días debe comprar cada producto, y cuánto de cada producto debe vender cada día. Para decidir esto se utilizan variables auxiliares como qué cantidad de cada producto hay según en cuántos días vence, el presupuesto del supermercado para cada día y la cantidad de comida que vence por día, la cual es la variable que se desea minimizar. Por último, se utilizan dos variables de activación, las cuales definen si en cada día se compra el producto p o no en el día t , y si se compra algún producto del tipo q o no en el día t .

Se comienza con un presupuesto PR al inicio del período, el cual va cambiando a medida que se reciben ingresos y se gasta en costos. Este presupuesto cambia a medida que se compran y venden unidades, y en ningún momento puede ser excedido. Cada producto p tiene, en el día t , una demanda d_{pt} que debe ser suplida sin excepciones.

Realizar un pedido del producto p en el día t tiene tanto un costo fijo F_{pt} , como un costo variable por cada unidad comprada n_{pt} , el cual incluye el transporte de ese producto hacia la bodega del supermercado. Esta bodega se encuentra en el mismo supermercado, por lo que no se incurren costos al momento de transportar los productos de la bodega al supermercado cuando quieren ser vendidos.

Cada producto tiene una cantidad $minc_p$ definida por el proveedor, la cual determina la cantidad mínima que se debe comprar por pedido. Además, cada tipo de producto tiene un proveedor

distinto. Se puede realizar máximo dos pedidos a la semana para cada producto, siendo para cada pedido, máximo un camión. Cabe destacar que los camiones con las compras de productos llegan al supermercado cierto día en la mañana antes de que se comience a vender, y el volumen máximo que puede transportar un camión del proveedor del producto p es $maxc_p$.

Además, el supermercado puede almacenar sus productos en bodegas desde el día t al $t + 1$, por un precio de b_{pt} diario para cada producto p . Se sabe que el volumen que ocupa una unidad del producto p es v_p y que el volumen máximo que se puede almacenar en la bodega para todos los productos del tipo q es V_q .

Cada producto tiene una misma cantidad de días desde que se compra hasta que se vence y no se puede vender un producto que vence ese mismo día. Esta última restricción define que todos los días en la noche pasa una máquina que saca todos los productos que vencen el día siguiente, pues estos no podrán ser vendidos.

Se considera como día inicial $t = 1$, como un lunes, para facilitar el análisis semanal de los pedidos. Por la misma razón, se asume que T es un múltiplo de 7, para poder analizar el modelo para un número entero de semanas. Al inicio del día 1 el inventario de todos los productos es 0. Además, no es necesario realizar un inventario para el día T , ya que en el día $T + 1$ no analizaremos lo que pasa en el supermercado.

El modelo presentado anteriormente tiene el potencial de generar impacto en la sociedad. Según estadísticas de RTS, una compañía enfocada en el desperdicio de alimento, un 30 % de la comida que se compra en los supermercados se desecha, lo que equivale, en un supermercado promedio, a 7 millones de toneladas por año. Esta cantidad de comida está valuada en aproximadamente el doble de los ingresos obtenidos por el supermercado en un año. En un supermercado promedio, estos ingresos son de \$14 millones de dólares(CHRON, 2022).

Si se estima que con el modelo presentado se puede bajar ese 30 % a un 10 % de comida desperdiciada por año, el potencial impacto para un supermercado sería el siguiente:

- Se podrían vender 4,6 millones de toneladas de comida que anteriormente se desperdiciaban.
- Se ahorrarían \$18,7 millones de los \$28 millones de dólares que antes se gastaban en comida que se desechaba.

Asimismo, según el World Resources Institute, cada año se desperdician globalmente 1.300 millones de toneladas de alimentos, dentro de los cuales hay 170 billones de litros de agua, lo cual equivale al 24 % de toda al agua fresca utilizada para la agricultura (GMO, 2021).

Si extendemos el modelo a todos los supermercados y se estima una reducción del 20 % de los parámetros anteriores, el potencial impacto sería el siguiente:

- Se ahorrarían 34 billones de litros al año, que se utilizaban para producir la comida desperdiciada. Lo que equivale a un 4,8 % del agua utilizada para la agricultura.

2. Modelo de Optimización de cantidad de alimento desperdiciado por un supermercado

2.1. Subíndices y conjuntos

- Productos: $p \in P$
- Días: $t \in \{0, \dots, T\}$
- Días vencimiento: $e \in \{1, \dots, T\}$
- Tipo de Producto $q \in (C \vee R \vee A)/C \subseteq P, R \subseteq P, A \subseteq P$

(C: Productos Congelados, R: Productos Refrigerados, A: Productos a temperatura ambiente)

2.2. Parámetros

- F_{pt} : Costo fijo por hacer un pedido del producto p el día t .
- n_{pt} : Costo de una unidad de p en el día t .
- b_{pt} : Precio por guardar una unidad del producto p en bodega desde el día t al $t + 1$.
- V_q : Volumen máximo que se puede almacenar en la bodega del tipo de producto q .
- v_p : Volumen que ocupa una unidad del producto p .
- d_{pt} : Demanda del producto p en el día t .
- $minc_p$: Mínima cantidad que se puede pedir del producto p .
- $maxc_p$: Volumen máximo que se puede transportar del producto p .
- PR : Presupuesto inicial.
- z_p : Precio de venta del producto p .
- exp_p : Cantidad de días para que se venza p después de haberlo comprado.
- u_p : Costo de desechar un producto p debido a que está vencido.

2.3. Variables

- c_{pte} : Cantidad comprada del producto p en el día t que vence en e días.
- $C_{pt} = \begin{cases} 1 & \text{si se decide comprar el producto } p \text{ en el día } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
- s_{pte} : Cantidad vendida del producto p en el día t que vencía en e días.
- i_{pte} : Cantidad en el inventario del producto p al final del día t que vence en e días.
- w_{pt} : Cantidad de p desechada al final del día t , porque vence en $t + 1$.
- B_t : Presupuesto del supermercado al final del día t , después de haber pagado el bodegaje para la noche.

2.4. Función Objetivo

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{p \in P} w_{pt}$$

2.5. Supuestos

- El supermercado puede realizar máximo dos pedidos a la semana para cada producto, teniendo cada pedido como máximo un camión con productos.
- El día inicial $t = 1$, corresponde al día lunes. Además, T es un número múltiplo de 7.
- El inventario inicial para cada producto es 0. Además, no es necesario realizar un inventario para el día T , ya que en el día $T + 1$ no analizaremos lo que pasa en el supermercado.
- Al final del día t , se retiran los productos que vencen el día $t + 1$, para que no sean comprados por consumidores.
- La bodega del supermercado se encuentra en este mismo, es decir, se pueden vender productos que están almacenados en la bodega. Adicionalmente, en la bodega se almacenan los productos por cada tipo de producto, es decir, refrigerados, congelados y temperatura ambiente.
- Cada producto tiene un proveedor específico.
- El precio n_{pt} considera el precio de un producto p y su costo de transporte.
- Cada producto tiene una misma cantidad de días desde que se compra hasta que se vence.
- Los camiones con las compras de producto llegan al supermercado ese día en la mañana antes de que se comience a vender.
- El presupuesto inicial es mayor a 0

2.6. Restricciones

- No gastar más del presupuesto: Se considera un presupuesto variable sumando los ingresos por ventas y restando costos de compras, bodegas hasta el día t y el costo de desechar los productos que vencen el día $t+1$.

$$B_t = B_{t-1} + \sum_{p \in P} \sum_{e=1}^T (s_{pte} \cdot z_p) - \sum_{p \in P} \sum_{e=1}^T (c_{pte} \cdot n_{pt}) - \sum_{p \in P} (w_{pt} \cdot u_p) - \sum_{p \in P} \sum_{e=2}^T (i_{pte} \cdot b_{pt}) - \sum_{p \in P} (C_{pt} \cdot F_{pt}) \quad \forall t \in \{2, \dots, T\} \quad (1)$$

$$B_1 = PR \quad (2)$$

- Relación entre variables:

$$c_{pte} \leq C_{pt} \cdot M \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall e \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P, M \gg 0 \quad (3)$$

$$\min c_p \cdot C_{pt} \leq c_{pte} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall e \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P : e = \exp_p \quad (4)$$

- Inventario inicial:

$$i_{p0e} = 0 \quad \forall e \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P \quad (5)$$

- Inventario:

$$i_{pte} = i_{p(t-1)(e+1)} + c_{pte} - s_{pte} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall e \in \{1, \dots, T-1\}, \forall p \in P \quad (6)$$

$$i_{ptT} = c_{ptT} - s_{ptT} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P \quad (7)$$

- Cada producto comprado tiene exp_p como su fecha de vencimiento:

$$c_{pte} = 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P, \forall e \in \{1, \dots, T\} : e \neq exp_p \quad (8)$$

- Tener suficiente inventario para suplir la demanda:

$$\sum_{e=2}^T (i_{p(t-1)e} + c_{pte}) \geq d_{pt} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P \quad (9)$$

- Capacidad bodega:

$$\sum_{p \in q} \sum_{e=2}^T i_{pte} \cdot v_p \leq V_q \quad \forall q \in \{C, R, A\}, \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (10)$$

- Capacidad transporte:

$$\sum_{p \in P} \sum_{e=1}^T c_{pte} \cdot v_p \leq maxc_p \quad \forall p \in P, \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (11)$$

- Vender la cantidad demandada:

$$\sum_{e=1}^T s_{pte} = d_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (12)$$

- Definir variable con cantidad de comida vencida:

$$w_{pt} = i_{pt1} \quad \forall p \in P, \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (13)$$

- Máximos pedidos por semana:

$$\sum_{t \in \{1+N \cdot 7, \dots, 7+N \cdot 7\}} C_{pt} \leq 2 \quad \forall p \in P, \forall N \in \{0, \dots, (T/7) - 1\} \quad (14)$$

- Naturaleza de las variables:

$$c_{pte} \geq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P, \forall e \in \{1, \dots, T\} \quad (15)$$

$$s_{pte} \geq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P, \forall e \in \{1, \dots, T\} \quad (16)$$

$$i_{pte} \geq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P, \forall e \in \{1, \dots, T\} \quad (17)$$

$$w_{pt} \geq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P \quad (18)$$

$$B_t \geq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (19)$$

$$C_{pt} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall p \in P \quad (20)$$

3. Datos

En la carpeta datos se pueden encontrar dos archivos, ambos con los mismos datos que se utilizarán para el proyecto. Se simularán 100 productos para un espacio de 28 días, lo que serían 4 semanas completas, comenzando desde un día lunes.

En cuanto a los archivos, en primer lugar, está el archivo con terminación .ipynb en el cual hay una explicación de cada parámetro antes de su código de Python correspondiente que crea este parámetro. En segundo lugar, hay un archivo .py con el mismo contenido que el Jupyter. Este archivo es el que se importa desde main.py para hacer uso de los datos en el modelo y así obtener los resultados.

Por último, cabe mencionar que se intentó utilizar datos de empresas reales, como Cornershop, pero esta no estuvo dispuesta a colaborar por temas de confidencialidad empresarial.

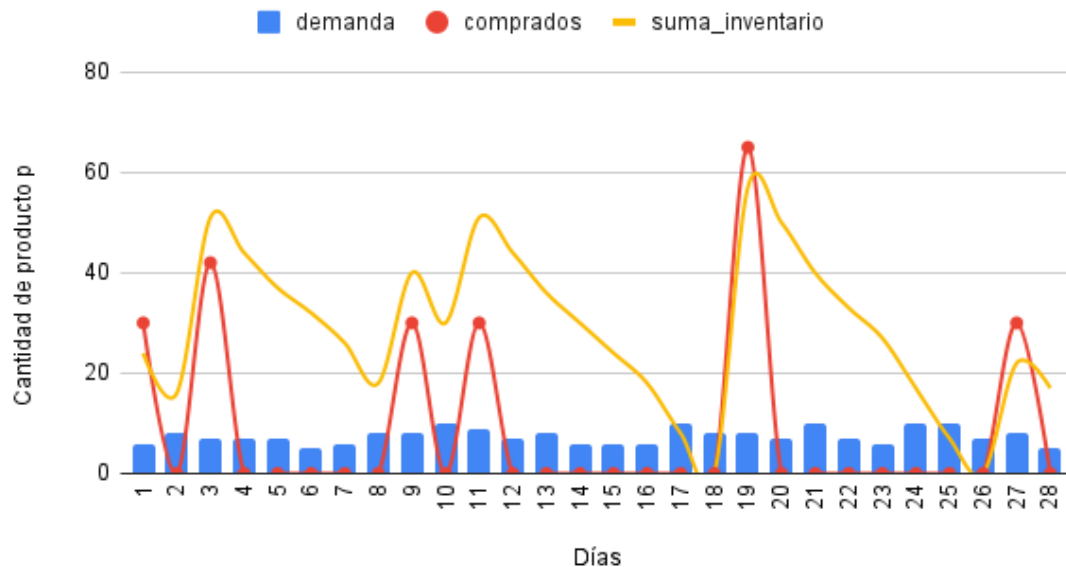
4. Resultados

Los datos mencionados previamente se reemplazaron en el modelo para poder resolverlo mediante un software de programación, Gurobi de Python. Al correr el programa, se puede ver que el valor óptimo de la función objetivo es 87 unidades y se puede ver una serie de resultados relevantes para el modelo.

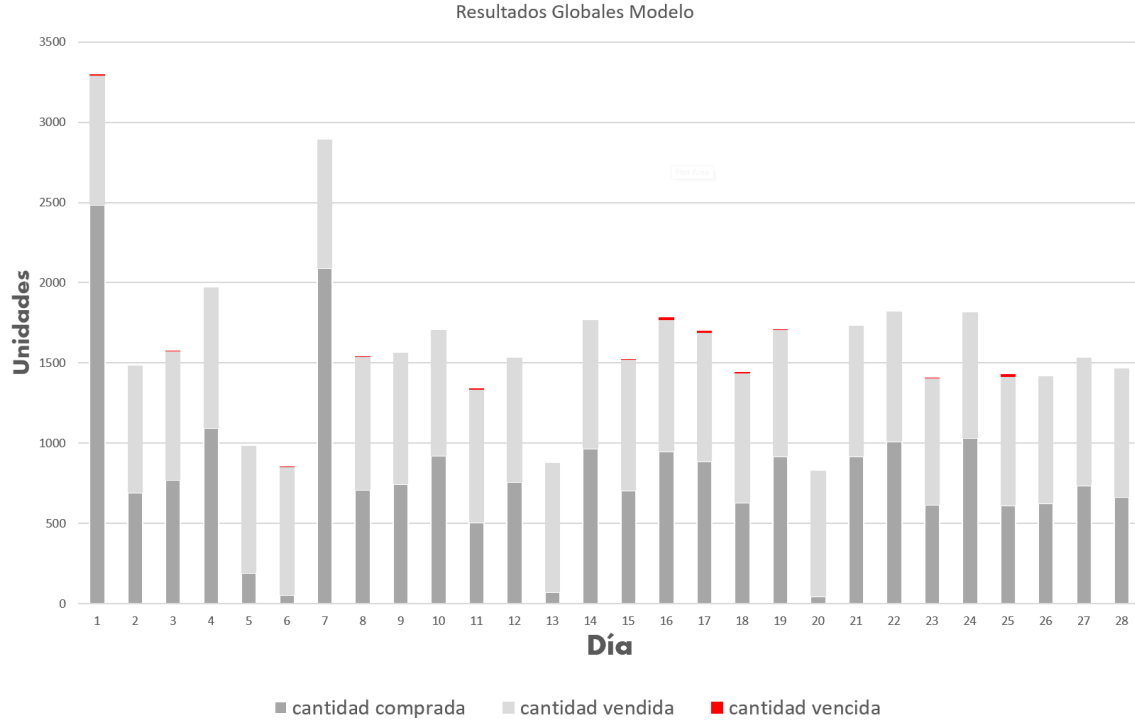
Para nuestro problema modelado existen una gran cantidad de datos y variables asociadas a cada uno de los productos y días, por lo cual se decidió mostrar los resultados de solo uno de los productos, verificando que el modelo funciona correctamente.

A continuación se presenta un gráfico con los resultados del producto 1 para los 28 días que simula el modelo.

Gráfico Resultados



El siguiente gráfico muestra de forma más global los resultados que obtiene el modelo. Para cada día, el gráfico ilustra qué cantidad total de productos fueron comprados, vendidos y cuántos productos vencieron en total en el supermercado:



Se puede ver que cada vez que se hace un pedido, se intenta de utilizar la mayor cantidad de productos en el inventario sin vencer. Por esta razón, las curvas de cantidad comprada y suma de inventario van de la mano. Cuando la suma del inventario disminuye, se puede ver que posteriormente se realiza un pedido, es decir, la curva de la cantidad comprada aumenta para suplir la demanda. Además, cuando el inventario llega a 0, o se vencen todos los productos de la compra anterior, se realiza una nueva compra, lo cual se puede ver cuando la curva roja y amarilla llegan ambas cercanas a 0.

Luego, teniendo en consideración todo el período de tiempo para el producto 1, el valor que toma la función objetivo es de 0 productos perdidos debido a su fecha de expiración. Es decir, no se desperdicia ningún producto 1 durante todo el período.

5. Análisis de Sensibilidad

Al resolver el modelo mediante un software de programación apropiado, se obtienen valores óptimos en base a los parámetros previamente establecidos. Por lo que, al alterar alguno de estos parámetros, los valores óptimos cambian. Por lo tanto, se puede analizar en cuánto varían los resultados obtenidos al alterar alguno de los parámetros.

5.1. Análisis variación de pedidos máximos a la semana

Actualmente, en nuestro modelo tenemos un límite de 2 pedidos máximos a la semana para cada producto. Es por eso que analizaremos como varía el valor actual de nuestra función objetivo, el cual es 87, a medida que cambiamos este parámetro dejando el resto del modelo constante.

- Cantidad máxima de pedidos a la semana=1

En este caso, el problema se vuelve infactible, lo cual tiene sentido debido a que si limitamos mucho la cantidad de pedidos que se pueden hacer para cada producto, teniendo en cuenta que los días de vencimiento de cada producto son de 3 a 5. Con 1 pedido a la semana no se logra satisfacer la demanda para toda la semana.

- Cantidad máxima de pedidos a la semana=3
En este caso, el problema se mantuvo factible. La cantidad de productos que se vencen es de 82, disminuyendo un 5,75 % con respecto al valor objetivo original.
- Cantidad máxima de pedidos a la semana=4
En este caso, el problema se mantuvo factible. La cantidad de productos que se vencen es nuevamente 82, disminuyendo un 5,75 % con respecto al valor objetivo original.

Variación de pedidos máximos a la semana				
Casos	Caso 1	Caso original	Caso 2	Caso 3
Cantidad de pedidos	1	2	3	4
Valor F.O	Infactible	87	82	82

A partir de estos resultados, notamos que a medida que aumentan la cantidad de pedidos máximos que se pueden realizar en la semana, mejora el valor de la función objetivo. Esto es lógico debido a que se pueden hacer pedidos con menos productos, pero más seguidos, así no se guardan tanto tiempo en inventario. Sin embargo, mejora hasta cierto punto donde se mantiene constante, ya que no existe un parámetro que limita la cantidad mínima de productos que se pueden realizar en cada pedido, por lo que ya no permitirá seguir aumentando la cantidad de pedidos que se realizan, con menos productos cada uno.

5.2. Análisis variación de demanda para cada producto

Actualmente, el modelo utilizado determina para cada producto una demanda que va entre 5 y 10 unidades diarias.

Ahora se supondrá que el modelo se enfrenta a un escenario de aumento de demanda, tal como ocurrió en los supermercados los días previos a que se declarara cuarentena durante la pandemia. Suponiendo que ahora la demanda es de 6 a 11 unidades por día por producto, si se mantienen todos los otros parámetros iguales, el valor objetivo pasa de ser 87 unidades vencidas a ser 11 unidades vencidas. Esto sucede porque se tiene una mayor demanda y no se varía ningún otro parámetro, por lo que esas 87 unidades que antes se vencían, ahora el modelo es capaz de vender 76.

Siguiendo esta misma línea de aumento de demanda, si es que ahora la demanda es de 7 a 12 unidades por día por producto, el modelo pasa de tener 87 unidades vencidas a 0. Esto pasa, al igual que en el paso anterior, porque con una mayor demanda el modelo es capaz de vender las unidades que anteriormente vencían.

Por otro lado, si es que por alguna razón disminuye la demanda, y suponiendo que ahora las unidades diarias demandadas por producto se encuentra en un intervalo entre 4 y 9, las unidades vencidas pasan de ser 87 a ser 293. Si es que se disminuye la demanda sin cambiar la cantidad mínima que se debe pedir, y sin cambiar la cantidad máxima de pedidos que se pueden hacer por semana, la cantidad de unidades vencidas debería aumentar. Existen 206 unidades que antes se vendían y ya no se venden, y que por otras restricciones no se pueden dejar de pedir.

Por último, si es que la demanda disminuye aún más, dejándola en un intervalo entre 3 y 8 unidades diarias, las unidades diarias vencidas aumentan hasta 736.

A continuación se muestra una tabla con todos los casos recién mencionados:

Variación de demanda para cada producto					
Casos	Caso 1	Caso 2	Caso original	Caso 3	Caso 4
Demanda	3 a 8	4 a 9	5 a 10	6 a 11	7 a 12
Valor F.O	736	293	87	11	0

5.3. Análisis variación de capacidad de bodega

Actualmente, nuestro modelo presenta una capacidad máxima de bodega que corresponde al volumen máximo que se puede almacenar de los productos de tipo q . En primer lugar, para los productos que se conservan a temperatura ambiente, el volumen máximo es un valor aleatorio entre 150 y 170 m^3 . En segundo lugar, para los productos congelados, el volumen máximo varía entre los 75 y 90 m^3 . Por último, el volumen máximo para los productos refrigerados, varía entre los 75 y 90 m^3 . Cabe destacar que es relevante analizar este escenario, ya que al tener una restricción de la cantidad máxima de pedidos a la semana, puede ser necesario almacenar más productos en bodega con el fin de suplir la demanda.

- Aumentando el máximo volumen de los tres tipos de productos en un 10 %, lo que queda en 165 a 187 m^3 para los productos a temperatura ambiente, y entre 83 y 99 m^3 para los productos refrigerados y congelados.
- Disminuyendo el máximo volumen de los tres tipos de productos en un 10 %, lo que resulta en 135 y 153 m^3 para los productos a temperatura ambiente, y entre 68 y 81 m^3 para los productos refrigerados y congelados.

Variación de capacidad de bodega			
Casos	Caso 1	Caso original	Caso 2
Volumen respecto al original	110 %	100 %	90 %
Valor F.O	87	87	87

A partir de lo obtenido, podemos concluir que la restricción asociada a la capacidad de bodega del modelo no está activa. Pues, al aumentar o disminuir el volumen para almacenar cada tipo de producto, el valor objetivo del modelo sigue siendo el mismo, es decir, 87.

5.4. Análisis variación de mínima cantidad que se puede pedir para cada producto

Actualmente, el parámetro definido de la mínima cantidad que se puede pedir para cada producto corresponde a un valor entre 18 y 23 unidades. Se analizará cómo varía el valor actual de la función objetivo a medida que este valor sea alterado.

Es relevante analizar el cambio de este parámetro, ya que los supermercados le compran a diversos proveedores, los cuales venden al por mayor. Es por esto, que cualquiera de los proveedores puede cambiar la cantidad mínima de productos a pedir, y el supermercado se debe adaptar a esto.

- Valor de la mínima cantidad que se puede pedir para cada producto entre 20 a 25: En este caso, el problema es factible y la cantidad de productos que se vencen es 208, aumentando un 139,1 % con respecto al valor objetivo.
- Valor de la mínima cantidad que se puede pedir para cada producto entre 16 a 21: En este caso, el problema es factible y la cantidad de productos que se vencen es 25, disminuyendo un 71,26 % con respecto al valor objetivo.

Variación de mínima cantidad que se puede pedir para cada producto			
Casos	Caso 1	Caso original	Caso 2
Mínima cantidad	Entre 16 y 21	Entre 18 y 23	Entre 20 y 25
Valor F.O	25	87	208

5.5. Análisis crítico de restricciones activas

Para el análisis se utilizó el comando **Slack** en Python-Gurobi, el cual imprime las holguras de las restricciones, es decir, la diferencia entre el lado derecho y el izquierdo de la restricción. Si esta diferencia es 0, quiere decir que la restricción está tomando el mayor valor posible, es decir, es activa. A través de esto, se obtuvo la siguiente tabla:

Restricciones activas e inactivas		
Restricciones	Cantidad inactivas	Cantidad activas
R1	9884	236955
R2	0	1
R3	955	1845
R4	479	2321
R5	0	2800
R6	1	75599
R7	0	2800
R8	0	75600
R9	2382	418
R10	84	0
R11	2800	0
R12	0	2800
R13	0	2800
R14	25	275
R15	955	77445
R16	3063	75337
R17	2895	75505
R18	34	2766
R19	28	0

Podemos notar que las restricciones 2, 5, 7, 8, 12 y 13 están **activas** en todos los casos y las restricciones 10, 11 y 19 están **inactivas** en todos los casos. Dado que el modelo itera sobre días y productos, se generan diferencias en la actividad e inactividad de las restricciones restantes. Sin embargo, viendo la diferencia en la cantidad de restricciones inactivas y activas para cada una de ellas, se puede concluir que las restricciones 1, 3, 4, 6, 14, 15, 16, 17 y 18 son **activas**, mientras que la restricción 9 es **inactiva**. Por un lado, la gran mayoría de las restricciones están activas debido a que están cumpliendo la función que se les dio a cada una y están limitando el polítopo del problema para distintos valores de las variables. El hecho de que la gran mayoría de las restricciones estén activas demuestra que la gran mayoría de los datos y el modelo en sí son una buena referencia de a lo que se quiere llegar. Por el otro lado, las restricciones inactivas mencionadas anteriormente se analizarán a continuación.

La funcionalidad de la restricción 9 es que en el inventario haya una cantidad suficiente de producto para satisfacer la demanda. El hecho de que en ocasiones esta restricción esté inactiva significa que, en algunos casos, falta cantidad de producto. Esto se puede deber a que los productos tienen una fecha de vencimiento que debe ser respetada, y una vez cumplida, estos no pueden seguir siendo guardados en el inventario. Por esta razón, hace sentido que en ocasiones la restricción esté inactiva.

Las restricciones 10 y 11 hacen referencia a la capacidad en bodega y a la capacidad de transporte respectivamente. El hecho de que nunca estén activas quiere decir que la máxima capacidad de bodega y de transporte son siempre superiores a lo que se guarda y transporta en el modelo. Como el modelo es una pequeña representación de la realidad, es sensato que no todas las restricciones se cumplan al 100 %, para una mejor aproximación se pueden modificar estos parámetros para restringir más el modelo en futuras iteraciones.

Por último, la restricción 19 hace referencia a la naturaleza de la variable B_t , la cual corresponde al presupuesto del supermercado. El que no esté activa, quiere decir que el presupuesto nunca llega a 0, por lo que siempre se tiene más dinero del que se gasta.

6. Conclusiones

El modelo presentado en el presente informe representa relativamente bien cómo funciona el abastecimiento de un supermercado, pero tiene algunas falencias. De estas, podemos destacar que en el modelo no se considera ningún tipo de oferta en los precios de venta. En los supermercados, por lo general los productos que están por vencer tienen una disminución en su precio, por lo que es más probable que los clientes lo compren, pero esto no sucede en nuestro modelo. Otro punto importante donde falla el modelo a la hora de representar la realidad es en el contacto con los proveedores. En el modelo se definió como que cada producto tenía su propio proveedor, pero en los supermercados reales no siempre es así. Por último, otro concepto que no fue aplicado sobre el modelo es el del margen, el cual obliga a los supermercados a no poder vender un producto que vence en x días, estando x en función del tipo del producto. Sin embargo, si estas variables fueran tomadas en consideración y los datos utilizados en el modelo fueran 100 % verídicos, el modelo llegaría a ser un buen aporte a la toma de decisiones, ya que se pudo observar que la cantidad de productos desperdiciados era insignificante en comparación a la totalidad de productos. De una total de 22.510 productos, solo fueron desperdiciados 87, lo cual equivale a un 0,38 % del total. Así, nuestro modelo obtiene que por cada producto vencido, no se vencieron otros 260 que fueron vendidos exitosamente.

El objetivo general es lograr plantear un modelo del desperdicio de alimentos lo más realista posible, por lo que el desafío para el futuro consiste en arreglar las falencias encontradas del modelo para que este logre representar la realidad. En primer lugar, es necesario considerar aquellos días festivos en donde la demanda aumenta y varía más que solo un 10 % con respecto al día anterior y siguiente. Así, se podrá comprar lo necesario para tener el stock de productos para poder suplir la demanda correspondiente. En segundo lugar, el modelo debería tener en consideración la cantidad de proveedores que tiene asociado a los productos, ya que tener un proveedor para cada producto es lejano a la realidad. Por último, habría que tener en consideración la satisfacción del cliente, ya que al modelo solo le importa que se compren los productos no vencidos, sin considerar su aspecto y la satisfacción del cliente. Por ejemplo, el cliente no va a comprar alguna fruta o verdura que no cumpla con la estética, por lo que al considerar este factor, se perderán más productos que los planteados en el modelo. Por lo tanto, al tener en consideración y agregar al modelo aquellos arreglos, se podrá obtener un modelo que represente la realidad. Así se podrá efectivamente utilizar en la gestión de los supermercados y atacar a la problemática social y medioambiental del desperdicio de alimentos.

Sobre la solución, esta sí tiene valores realistas y que hacen sentido. Una muestra de esto es que dado que solo se pueden hacer dos pedidos a la semana, y que los pedidos tienen una capacidad mínima y máxima, es lógico que la mayoría de los pedidos se hagan los lunes (para satisfacer la demanda de la primera mitad de la semana), y cuando se acabe lo que se compró el lunes se haga un segundo pedido para el resto de la semana. Así, no tendría sentido hacer pedidos los domingos, pues, ¿para qué guardarse el segundo pedido hasta el último día? Esto solo aumentaría la cantidad de días que están los productos del primer pedido de la semana, con lo que aumentaría la cantidad de productos vencidos también. Esto se resuelve muy bien en el modelo, ya que se puede ver en el

gráfico con los resultados globales que los días 6, 13 y 20 son los con menor cantidad de productos comprados, siendo domingo en estos tres días.

A la hora de realizar cambios en los parámetros, el modelo resultó ser muy adaptable a estos cambios. El modelo se comportó excelente en cada uno de los casos, siempre aumentando o disminuyendo el valor objetivo según lo que se esperaba. De igual forma, al analizar que ocurre al cambiar parámetros pertenecientes a restricciones inactivas pudimos comprobar que el valor objetivo de la solución no cambia, como lo ocurrido al analizar la variación de la capacidad de bodega.

Las enseñanzas del grupo comenzaron, en primer lugar, investigando sobre el problema. Ninguno se había cuestionado ni dado cuenta lo real que era el desperdicio de comida en el mundo, y el gran problema que este suponía para los supermercados, tanto económica como sustentablemente hablando. Luego, a la hora de modelar se obtuvo una gran enseñanza sobre lo complejo que puede ser llevar un problema real a un modelo, porque nunca van a parar de aparecer posibles restricciones que se pueden implementar, y que le darían un grado más de realista al modelo. Otro punto en el que se ganó mucha experiencia fue cuando se tuvo que llevar el modelo al código, pues no se esperaba que migrar desde un modelo escrito a un código de Python que diera resultados, fuera un proceso tan largo y desgastador. Muchas horas de *debugging* fueron necesarias para que el código diera resultados. No obstante, este gran trabajo nos sirvió para darnos cuenta de que el esfuerzo da frutos, ya que logramos obtener un modelo que cumple los objetivos que nos propusimos, a pesar de que todavía le falta refinamiento, los resultados fueron mejores de lo esperado. Como grupo, llegamos a la conclusión que la optimización es una herramienta muy útil para muchos problemas que tenemos como sociedad actualmente, logra acercar las soluciones a algo más palpable y fácil de manejar, para luego ir escalando y descubrir soluciones de verdadera repercusión.

7. Referencias Bibliográficas

- [1] Forbes Staff. (2019, October 22). Metano: el malvado hermano gemelo del CO2. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/metano-el-malvado-hermano-gemelo-del-co2/>
- [2] Fight climate change by preventing food waste. (n.d.). World Wildlife Fund. Retrieved April 19, 2022, from <https://www.worldwildlife.org/stories/fight-climate-change-by-preventing-food-waste>
- [3] Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. (n.d.). Fao.org. Retrieved April 19, 2022, from <https://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/239393/>
- [4] Deutsche Welle (www.dw.com). (n.d.). Hambruna. DW.COM; Deutsche Welle (www.dw.com). Retrieved April 19, 2022, from <https://www.dw.com/es/hambruna/t-37951612>
- [5] Las impactantes cifras que deja el desperdicio de comida en el mundo (y cuáles son sus efectos). (2021, March 15). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56322961>
- [6] Pérdida y desperdicio de alimentos. (2019, July 22). ODEPA — Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/noticias/agro-en-la-prensa/perdida-y-desperdicio-de-alimentos>
- [7] Lewis, J. (2022, January 17). How does food waste affect the environment. Earth.Org - Past — Present — Future. <https://earth.org/how-does-food-waste-affect-the-environment/?gclid=Cj0KCQjwr>
- [8] Food systems account for more than one third of global greenhouse gas emissions. (n.d.). Fao.Org. Retrieved April 19, 2022, from <https://www.fao.org/news/story/en/item/1379373/icode/>
- [9] Turn down the heat: Why a 4°C warmer world must be avoided. (n.d.). Climateanalytics.Org. Retrieved April 19, 2022, from <https://climateanalytics.org/publications/2012/turn-down-the-heat-why-a-4c-warmer-world-must-be-avoided/>
- [10] Beatriz. (2021, February 23). Los comercios tradicionales generan hasta un 60 % menos de residuos que los supermercados. Financial Food. <https://financialfood.es/los-comercios-tradicionales-generan-hasta-un-60-menos-de-residuos-que-los-supermercados/>
- [11] Link, K. (2021, April 6). Supermarkets dig into the challenge of food waste. FoodPrint. <https://foodprint.org/blog/supermarkets-food-waste/>
- [12] Food losses wasted water. (n.d.). GMO Answers. Retrieved April 21, 2022, from <https://gmoanswers.com/food-waste-and-water-loss>