

DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).
Resolución N° 1178/11. Calificación "B".

*Algoritmos heurísticos para un modelo de optimización estocástica de
planificación de la producción y distribución*

Trabajo de tesis para optar por el título de Doctor en Ciencia y Tecnología de la Universidad
Nacional de General Sarmiento

Autor: **Enrique Fernández**

Director: Dr. Javier Marengo

Fecha: 29 de julio de 2024.

DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).
Resolución N° 1178/11. Calificación "B".

Algoritmos heurísticos para un modelo de optimización estocástica de planificación de la producción y distribución

Publicaciones:

- *Algoritmos heurísticos para un modelo de optimización estocástica de planificación de la producción y distribución.*
XXI Latin Ibero-American Conference on Operations Research. Diciembre 12 – 15, 2022. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.
- *Modelo de optimización lineal robusta de un problema de fabricación / distribución con demanda estocástica sujeta a un proceso de difusión – Estudio de un caso de distribución de un producto agrícola insumo para la producción de soja – Evaluación de tres heurísticas.*
48 JAIIO. Septiembre 16 – 20, 2019. Salta, Salta, Argentina.
- *Modelo de optimización lineal robusta de un problema de fabricación / distribución con demanda estocástica sujeta a un proceso de difusión – Estudio de un caso de distribución de un producto agrícola insumo para la producción de soja – Abordaje mediante heurísticas.*
47 JAIIO. Septiembre 3 – 7, 2018. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.
- *Modelo de optimización lineal robusta de un problema de fabricación / distribución con demanda estocástica sujeta a un proceso de difusión – Estudio de un caso de distribución de un producto agrícola insumo para la producción de soja.*
46 JAIIO. Septiembre 4 – 8, 2017. Córdoba, Córdoba, Argentina.
- *Optimización con evaluación mediante simulación – Estudio de un caso de distribución de un producto agrícola para el cultivo de soja.*
VI MACI 2017 – Sexto Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial. Mayo 2 – 5, 2017. Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.

Aportes Originales:

En el Capítulo 5 se describe una heurística que entregar una solución aproximada del problema planteado en un tiempo de procesamiento inferior a un 10 % del que se demora CPLEX en obtener una solución aproximada cercana.

La calidad de la solución entregada por la heurística es en muchos casos, superior a la entregada por CPLEX.

DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

Evaluado y acreditado por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU).
Resolución N° 1178/11. Calificación "B".

La simulación utilizada en el Capítulo 2 para el proceso de difusión incluye mecanismos que capturan la aleatoriedad que presenta la demanda de un producto que se puede ver condicionada por un mecanismo de contagio.

**Algoritmos heurísticos para un modelo de
optimización estocástica de planificación de la
producción y distribución**

Enrique Fernández

TESIS PARA ALCANZAR EL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DIRECTOR: DR. JAVIER MARENCO

RESUMEN. Se presenta el problema de producción y distribución de un producto que se utiliza para neutralizar el efecto que produce un agente sobre un cultivo.

Este agente que busca la destrucción del cultivo tiene las siguientes particularidades:

- emerge mediante un proceso no determinista,
- una vez que emerge tiene la capacidad de evolucionar a medida que avanza el tiempo,
- una vez que emerge puede trasladarse a otras zonas.

Se plantea un modelo de optimización lineal entera mixta estocástica para planificar la producción necesaria y el procedimiento de distribución, cubriendo un horizonte temporal anual segmentado en semanas, a partir del comienzo de la campaña anual del ciclo producción - distribución - venta en una región geográfica extensa.

Un plan óptimo de producción y distribución depende de la demanda del producto, la cual es, esencialmente no determinista. Se simula esta demanda sobre la base de un mecanismo de generación de escenarios, cada uno de los cuales tiene asociada una probabilidad de ocurrencia. Estos escenarios se generan mediante mecanismos de Montecarlo, de simulación de dispersión geográfica y conceptos de dinámica de poblaciones mediante la utilización de las ecuaciones de Lotka-Volterra.

Se establece como objeto de estudio para evaluación de los resultados las localidades en las cuales se produce soja en la República Argentina con una extensión temporal de 48 semanas.

La cantidad de variables involucradas en el modelo determina que no se encuentre solución exacta en un tiempo de cómputo aceptable, por lo cual se diseña un conjunto de heurísticas que ajustan la solución óptima de la relajación lineal, buscando resultados cercanos al óptimo en un tiempo de cómputo aceptable.

Todas las heurísticas son comparadas entre sí, con la solución óptima de la relajación lineal y contra la solución hallada por el paquete CPLEX con un tiempo de cómputo limitado. Se puede observar que una de las heurísticas provee soluciones de calidad, en muchos casos superiores a la solución hallada por el paquete CPLEX en una décima parte de su tiempo. En los casos en que la solución obtenida no es mejor, la diferencia entre ellas no supera el 1% de su valor.

Índice general

Capítulo 1. Introducción	1
1. Descripción del problema	4
2. Revisión bibliográfica	6
3. Optimización estocástica	14
4. Optimización robusta	23
5. Generación de escenarios	34
6. Dinámica de poblaciones	40
7. Contenido de la tesis	43
Capítulo 2. Generación de escenarios	47
1. Modelo de aparición y dispersión de la plaga	48
2. Procedimiento de generación de escenarios	55
Capítulo 3. Modelo de distribución / fabricación multiperíodo	65
1. Conjuntos y Parámetros	67
2. Variables de decisión	71
3. Función objetivo	73
4. Restricciones	78
5. Evaluación preliminar de performance	82
Capítulo 4. Modelo con demanda en los centros de distribución	93
1. Asignación de la demanda al centro de distribución	94
2. Parámetros	96
3. Variables de decisión	97
4. Función objetivo	98
5. Restricciones	101
6. Evaluación preliminar de performance	104

Capítulo 5. Heurísticas	113
1. Heurística de dos fases	115
2. Heurística de ajuste compensado con avance temporal	127
3. Heurística de ajuste por redondeo	134
Capítulo 6. Experimentación computacional	141
1. Características de la implementación	141
2. Variantes de las instancias	144
3. Efecto de la relajación lineal	149
4. Heurística de dos fases	153
5. Heurística de ajuste compensado con avance temporal	169
6. Heurística de ajuste por redondeo	189
7. Características funcionales de las soluciones halladas	203
8. Discusión	213
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros	217
1. Clusters de escenarios	218
2. Extensión del alcance	218
3. Calidad de la solución	219
4. Restricciones robustas	219
5. Ampliar la oferta de productos	220
Apéndice A. Notación del modelo demanda en centros de consumo (modelo CC)	221
Apéndice B. Notación del modelo demanda en centros de distribución (Modelo CD)	223
Apéndice C. Modelo con la demanda en los centros de consumo	225
Apéndice D. Log parcial modelo CC con un escenario	233
Apéndice E. Post-procesamiento optimización CPLEX modelo CC	239
Apéndice F. Función objetivo del ejemplo numérico del modelo CC	243
Apéndice G. Modelo con la demanda en los centros de distribución	247

Apéndice H. Post-procesamiento optimización CPLEX modelo CD	253
Apéndice I. Logs CPLEX del modelo con la demanda en los C. D.	255
Apéndice J. Campaña sojera 2013/14	267
Apéndice K. Coordenadas Geográficas de las Localidades	277
Apéndice L. Diversos planes de producción	285
Apéndice M. Planes de producción de mínima distancia	311
Apéndice N. Parámetros heurística de ajuste por redondeo mínimos y máximos	325
Apéndice. Bibliografía	327

Introducción

La agricultura ha tenido, históricamente, un peso importante en la actividad económica argentina. Según datos del Banco Mundial [16], en los últimos 20 años ha oscilado entre 4,5 % (1999) y el 10,3 % (2003) del PBI siendo el dato más reciente 7,1 % (2021).

Desde la óptica del comercio exterior, durante el 2012 las exportaciones de productos primarios representaron cerca del 24 % de las exportaciones totales, en tanto que para el 2016 éstas han superado levemente el 27 % [40].

La naturaleza de su producción es cíclica y contiene inherentemente una diversidad de riesgos, incluyendo dificultades debidas al clima y a la pérdida total o parcial de su producción por la acción de plagas de diversas características. Las principales plagas agrícolas son [9]:

- plantas no cultivadas o malezas;
- insectos, artrópodos y vertebrados que se alimentan de los cultivos; y
- agentes patógenos, entre ellos hongos, virus y bacterias.

El impacto económico depende de la plaga, el cultivo y la región geográfica afectada. Para neutralizar su acción, la industria química comercializa una serie de productos que permiten mitigar o detener su acción y reducir las pérdidas producidas. Según la Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes, el mercado estimado de productos fitosanitarios para el 2012 fue cercano a los u\$s 2400 millones [18].

Por último, la dispersión geográfica en la cual se realiza la producción en nuestro país es muy extensa (ver Figura 1.1). Según el sistema de datos abiertos de la Subsecretaría de Agricultura del Ministerio de Agroindustria Nacional [6], la superficie sembrada de soja en la temporada 2013 / 2014 fue de aproximadamente



FIGURA (1.1). Provincias en las cuales se produce soja en la Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de economía [50].

20 millones de hectáreas, distribuidas en 265 localidades que abarcan 15 provincias argentinas, valores que explicitan la extensión geográfica de la producción agrícola y, consecuentemente, el mercado de productos químicos utilizables.

En este ecosistema, se puede identificar un grupo de elementos:

- región agrícola en la cual se implanta un determinado cultivo,
- centros de fabricación,
- depósitos regionales con disponibilidad para abastecer a la zona de influencia, con la celeridad necesaria a partir de la detección de la plaga,
- el producto químico tratante,
- plaga.

El mercado requiere de las organizaciones, eficiencia, eficacia, creatividad y agilidad, para ser competitivo y definir sus estrategias encaminadas a la sostenibilidad del negocio. En este contexto las decisiones logísticas de producción y distribución son esenciales.

Una definición muy completa y simple de *logística* es la de las “7 Cs de la logística”, que define la *logística* como las operaciones que tienden a asegurar [58]:

- el producto **C**orrecto,
- en la cantidad **C**orrecta,
- en las condiciones **C**orrectas,
- en el lugar **C**orrecto,
- en el momento **C**orrecto,
- para el consumidor **C**orrecto y
- al costo **C**orrecto.

Una *cadena de suministros* puede definirse como una red integrada de recursos y opciones de traslado para el aprovisionamiento, fabricación, almacenamiento y distribución de materiales y productos. Su optimización es una tarea desafiante que se encuentra sujeta a una diversidad de incertidumbres [32].

Durante varios años se han estudiado extensamente en forma separada los problemas de producción y distribución. La evolución de la tecnología informática y los métodos de resolución hacen posible la planificación simultánea de ambas operaciones impactando sobre la eficiencia de las organizaciones y aumentando sus posibilidades de supervivencia en el entorno competitivo actual [30].

La integración de las decisiones de producción y distribución presenta problemas desafiantes para los fabricantes que buscan optimizar la cadena de abastecimiento. El objetivo es coordinar la producción, el inventario y la entrega para satisfacer la demanda de los clientes minimizando los costos o maximizando los beneficios [7, 61].

En una cadena de suministro las decisiones se pueden tomar en dos formas: centralizada o descentralizada.

En una cadena de suministro con decisiones centralizadas todas ellas son tomadas por un solo tomador de decisiones [32].

En cambio, cuando se toman las decisiones descentralizadas, éstas son realizadas por diferentes tomadores de decisiones con una relación jerárquica entre ellos y cada uno con sus objetivos particulares. Cada tomador debe interactuar con las decisiones tomadas por otros tomadores de decisiones [53].

Por lo expuesto, las operaciones logísticas de producción y distribución de la empresa fabricante del producto químico requieren tomar decisiones adecuadas sobre la cantidad a fabricar, el momento en el cual realizar la producción y el / los puntos de la región geográfica en donde se colocarán los productos a la espera de que se produzca la demanda con el objeto de alcanzar el máximo resultado esperado de su actividad empresarial.

1. Descripción del problema

En la presente tesis se estudian procedimientos para encontrar soluciones óptimas o de buena calidad para la planificación de las operaciones logísticas de producción y distribución en un contexto de incertidumbre. En particular, estamos interesados en el problema:

“Dado un modelo de difusión de plaga y una estimación de la demanda de plaguicidas, encontrar un plan de producción / distribución que optimice la utilidad esperada de la comercialización del plaguicida.”

Se asume que la aparición de la plaga es aleatoria y está sujeta a un proceso de difusión y contagio (dada la migración a localidades cercanas) y que, por lo tanto, la demanda del producto químico plaguicida también está afectada por este tipo de procesos.

El producto plaguicida se debe localizar en una zona cercana al lugar donde se requiere su consumo, ya que el tiempo que transcurre entre la detección de la necesidad de uso y su efectiva utilización debe ser el menor posible.

El comportamiento del mercado de este producto tiene las siguientes características:

- Una población con una cantidad de individuos que comienza a tener un valor mayor a cero mediante un proceso no determinista, que se encuentra bajo la influencia de un proceso de difusión acotado por una capacidad máxima y a un proceso de dispersión. De ahora en más se identifica como *variable traccionadora*.
- Una *demanda* que es traccionada por la población anterior, la cual debe ser satisfecha con el producto objeto de la planificación.
- Una dispersión geográfica segmentada en un conjunto de localizaciones en las cuales se desarrolla la dinámica entre los individuos de la población y la demanda.
- Un subconjunto de las localidades que concentran el abastecimiento, a modo de depósitos intermedios.
- Una necesidad de planificación de la producción.

Una solución al problema incluye la determinación de los siguientes elementos:

- cantidad a producir en cada centro de fabricación,
- traslados de material desde los centros de fabricación a los centros de distribución regionales,
- traslado de material desde los centros de distribución regionales a los puntos de ventas ubicados en cada localidad.

La función objetivo debe maximizar el resultado esperado de la explotación contemplando los siguientes elementos:

- ingreso esperado por venta del producto en cada una de las localidades,
- costo de fabricación,
- costo de transporte desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución,
- costo de transporte desde los centros de distribución hasta las localidades que son puntos de venta o consumo,
- costo de puesta en marcha y funcionamiento del centro de distribución,
- costo de mantener el stock en el centro de distribución,
- penalidad por re-despachos entre los centros de distribución,
- penalidad esperada por la demanda insatisfecha que se produce en los centros de consumo,
- penalidad esperada por el sobre-stock que se produce en los centros de consumo.

La problemática que se presenta en esta tesis se puede observar en otros productos y/o situaciones en las cuales se puede aplicar el modelo aquí descrito. Por ejemplo:

- medicamentos para enfermedades contagiosas y de temporada,
- equipos costosos y escasos utilizados en emergencias médicas,
- distribución de elementos de lucha contra el fuego en zonas de peligro de incendio, etc.

Esta categoría de problemas se suele encontrar en la literatura bajo las siglas PDPP *Production Distribution Planning Problem* con diferentes amplitudes y características de los parámetros intervinientes.

2. Revisión bibliográfica

En esta sección se realizan breves comentarios sobre la bibliografía identificada que cubre los diferentes conceptos que son utilizados en la presente tesis:

- modelos integrados de planificación y/o producción y/o distribución,
- soluciones basadas en programación entera mixta,
- soluciones basadas en heurísticas y metaheurísticas,
- cadena de suministro,
- producción agrícola y/o ganadera,
- conjuntos difusos,
- teoría de la decisión,
- dispersión e interacción de especies.

En [27] se describe un modelo cuyos componentes son plantas de fabricación, líneas de producción, diversidad de productos en cada línea, planificación anual con desagregado mensual, depósitos y clientes finales. Comienza describiendo un modelo uni-período para describir su versión multiperíodo cuya función objetivo consiste en minimizar los costos. Destaca la dificultad para obtener una solución óptima al problema.

En [52] se incorpora a la visión integrada de producción y distribución la problemática del ruteo de vehículos realizando una revisión bibliográfica del problema notando la escasa presencia de problemas de complejidad cercana a los que se presentan en la industria para terminar proponiendo un marco de referencia para trabajos futuros.

El enfoque general para abordar el problema del suministro, fabricación, envío y distribución de los productos de una empresa con demanda establecida en forma anual se plantea en el modelo expresado en [76] que involucra desde la compra de materias primas hasta la entrega de los productos terminados en los centros de distribución de destino. Este problema se formula con un modelo matemático donde la función objetivo busca minimizar el costo total incluyendo el de compra, el de fabricación y los costos de transporte e inventario.

Los modelos de programación lineal entera mixta siguen presentes en [36] donde se aplica a la planificación de la cadena de suministros a nivel global de productos químicos con el objetivo de maximizar las ganancias reflejando las actividades

de ventas, distribución, producción y aprovisionamiento utilizando como caso de estudio una situación real de la industria.

Las metaheurísticas aplicadas a problemas integrados se encuentran utilizadas en [64] donde se propone un procedimiento de búsqueda tabú para abordar el problema de la coordinación óptima de un sistema de producción y distribución (PDPP) durante períodos múltiples con horizonte finito, donde una instalación produce varios artículos que se distribuyen a un conjunto de clientes con demanda conocida mediante una flota de vehículos homogéneos. La resolución del problema determina, por un lado, la producción de cada artículo en cada período, y la cantidad de cada artículo que se debe entregar a cada cliente junto con la ruta que debe realizar el vehículo que realiza la entrega minimizando todos los costos operativos.

Con un enfoque colaborativo entre las distintas organizaciones que componen una cadena de abastecimientos en [59] se enfrenta el problema de la coordinación entre ellas determinando el problema como *supply chain production planning (SCPP)* teniendo en cuenta no solamente la reducción de los costos logísticos, sino también reduciendo los conflictos que se suelen presentar entre los diferentes agentes de la cadena de distribución. El modelo propuesto actúa en tres niveles: la planificación global de la cadena, la planificación de la producción en cada una de las empresas, y la programación de las tareas de producción en ellas.

La planificación de la cadena de suministros considerando objetivos múltiples se desarrolla en [37] buscando minimizar los diferentes rubros de costos contemplando restricciones realistas de capacidad de la fábrica, del centro de distribución, inventario y vehículo de transporte, balance de inventario, pedidos pendientes, etc. planteando un problema de programación por restricciones.

En [67] se propone una planificación de producción multi-sitio que integra planes de aprovisionamiento y distribución en una red de cadena de suministro de varios escalones con múltiples proveedores, múltiples plantas de fabricación y múltiples centros de distribución donde el tamaño de la flota, el tipo de vehículo y el enrutamiento debe optimizarse junto con el aprovisionamiento, la producción, distribución e inventario. Propone un enfoque de dos pasos. En un primer paso el

modelo se resuelve mediante programación de entera mixta contemplando todas las restricciones expresadas con excepción del ruteo de los vehículos. En el segundo paso se aplica un algoritmo de búsqueda de dispersión (SS) para resolver el problema consolidado. Se expone una instancia basada en una empresa ensambladora de automóviles.

En [3] se analiza un sistema de producción y distribución de comidas congeladas con el propósito de mejorar la sostenibilidad, bajo el concepto del “triple impacto” comprendiendo los aspectos económicos, ambientales y sociales. Se identifican las decisiones de planificación importantes en relación a la producción y distribución. Sobre esta base se plantea una aplicación de apoyo a la toma de decisiones que resuelve un problema de programación lineal entera mixta para las tareas de planificación a nivel táctico, incluida la decisión del empaque a utilizar y las estructuras de entregas a realizar.

Los problemas de producción aplicados a la producción agrícola son tratados mediante programación lineal, en [55] donde se encuentra un modelo de producción óptima para pequeñas explotaciones agrícolas.

En la órbita de la producción ganadera, se puede encontrar en [4] un modelo de programación lineal entera para optimizar la producción y niveles de inventarios de la cadena de comercialización de carne porcina, la más consumida en el mundo. Los planes de producción se plantean a nivel operativo contemplando los distintos estados evolutivos del ejemplar y el inventario de los diversos subproductos.

En [47] se detalla un modelo que describe las estrategias de producción, consumo, venta, compra y almacenamiento de los agricultores de la meseta central de Burkina Faso en África occidental desde el inicio de la temporada de cultivo hasta un año después del período de cosecha. Se trata de establecer en qué medida los agricultores pueden utilizar estrategias que garantizan alimentos suficientes para sus hogares y qué cambios se pueden hacer para garantizar niveles sostenibles más altos de la seguridad alimentaria. Se utiliza un modelo de programación lineal que se centra en un hogar agrícola sin utilizar “insumos modernos” como fertilizantes químicos ya que los agricultores solo tienen a su disposición recursos locales como

tierra, trabajo y estiércol. La variabilidad de las precipitaciones es extremadamente alta y explica gran parte de la incertidumbre que rodea los agricultores. La toma de decisiones secuencial es una de las formas más importantes de afrontar el riesgo debido a lluvias inciertas. En el documento, se presenta un modelo de programación estocástica para describir las decisiones secuenciales de los agricultores en reacción a la lluvia que se manifiesta.

La teoría de los conjuntos difusos es uno de los enfoques que permiten considerar la incertidumbre, en [2] se proporciona un modelo de planificación que integra la producción y distribución en una cadena de suministro aplicando programación lineal biobjetivo difuso multiperíodo. Los productos se entregan a los minoristas a través de estrategias de cross docking o envío directo y se utilizan números difusos triangulares para representar los parámetros inciertos. Incluye un ejemplo numérico para validar la aplicabilidad del modelo.

La misma teoría de los conjuntos difusos se observa en [35] modelando el problema de planificación de la producción de un solo artículo con demandas inciertas caracterizadas por intervalos difusos cuyas funciones de pertenencia son distribuciones de posibilidad por los valores de las demandas. En este marco, se trata de obtener una solución expresando planes de producción de características robustas. Describe algoritmos y se presentan los resultados de los experimentos realizados con ellos.

Apelando a la teoría de la decisión en ambientes de incertidumbre en [21] se construye un modelo colaborativo para la coordinación de la producción y distribución con incertidumbre en la demanda y se muestra el algoritmo diseñado para aproximar una solución aceptable.

La dificultad en encontrar una solución óptima al problema se incrementa en la medida que crece la cantidad de elementos que participan en la cadena de suministro, provocando la búsqueda de soluciones mediante heurísticas como los algoritmos genéticos descriptos en [56].

En [15] se describe el concepto de *metaheurísticas híbridas* que consiste en la hibridación de metaheurísticas con otras técnicas de optimización pudiendo ser metaheurísticas u otros algoritmos de optimización exacta. En el trabajo se proporciona una revisión de algunas de las líneas de hibridación más importantes acompañada de ejemplos ilustrativos. Así también es tendencia la incorporación de características del problema a resolver en estos procedimientos. En cierta medida, las heurísticas que se presentarán en esta tesis se encuentran en esta línea.

Se propone un enfoque integrado para optimizar la producción, el inventario y la distribución en una configuración de varios períodos, varios artículos y varios tipos de vehículos de transporte en [17] investigando el valor de coordinar la producción con la distribución. El procedimiento obtiene un primer plan de producción utilizando programación lineal entera y el plan de distribución (conjunto de viajes de vehículos en cada período) se construye utilizando una metaheurística de búsqueda tabú que no cambia la plan de producción. En la siguiente iteración, primero se determina un plan de producción mejorado considerando el plan de distribución de la interacción anterior como una restricción. Luego, se calcula un nuevo plan de distribución dado el nuevo plan de producción. El proceso se detiene cuando los dos planes se estabilizan.

Se conoce como *Modelos de distribución de especies*, según [48], al conjunto de herramientas y conceptos que permiten estudiar la evolución de las poblaciones en espacio y tiempo buscando explicaciones a los fenómenos más diversos como biogeografía, biología del cambio climático, de la conservación entre otras. Inicialmente los trabajos se fueron realizando sobre las especies vertebradas pero recientemente se ha avanzado hacia otros organismos.

Por otra parte, en [74] se describen modelos de dispersión de especies entre dos zonas con diversas mecánicas sincrónicas, asincrónicas o mixtas, observando la dinámica de la población en ambas zonas y el impacto que poseen en él la tasas de dispersión.

En [54] se presenta un modelo para evaluar la transmisión de la enfermedad del dengue mediante el mosquito *Aedes Aegypti* donde se segmenta una zona en

cuadrículas y se establece la probabilidad de que el vector se traslade de una a otra con una magnitud proporcional a la inversa del cuadrado de la distancia entre las cuadrículas de origen y destino.

El clásico modelo de predador presa es ampliado con el intercambio entre dos zonas (parches) en forma de movimiento migratorio discontinuo en [73] utilizando enfoques analíticos y elementos de las ecuaciones diferenciales impulsivas. Expone simulaciones numéricas para evaluar el impacto de la tasa de crecimiento de ambas poblaciones en la permanencia o extinción de los individuos de la población.

La estrategia de dispersión de los insectos terrestres es evaluada en [5] estableciendo la diferencia entre dispersión y migración. La migración esta vinculada al movimiento de los individuos en una dirección para la ubicación de los recursos necesarios, en cambio, la dispersión se asocia más al distanciamiento entre los individuos con traslados en diversas direcciones.

En [39] se indica que los fenómenos de dispersión han sido difícil de incluir en los modelos de distribución de especies. El artículo compara una diversidad de modelos remarcando que no siempre se pueden constatar con movimientos reales medidos mediante sistemas de información geográfica. Aplica técnicas estadísticas a los datos de aves en el período 1988 a 1991 en Gran Bretaña. Uno de los modelos de dispersión analizado se denomina de *Tasa de dispersión fija*, que consiste en aplicar una tasa de dispersión amortiguada por la distancia.

Se evalúan los modelos de distribución de especies invasivas en [68] realizando un trabajo estadístico para predictores de invasión de un patógeno forestal en la zona de California. Se exploran dos modelos basados en 890 parcelas donde se ha observado la presencia del patógeno en relación con indicadores climáticos, topográficos y de vegetación huésped realizando un aporte en la comprensión de los mecanismos de prevención de ataques de especies invasoras.

Las plagas de insectos que atacan a los cultivos agrícolas son migrantes de larga distancia [62] y no responde a características de apetito, no se detienen a encontrar recursos potenciales, son fáciles de reconocer debido a su aparición repentina donde

habían estado ausentes apenas unos días antes. Además algunas plagas sobreviven a la diapausa ¹ emergiendo en zonas que no han sido destino de migraciones recientes.

El cálculo de probabilidades aplicado a la dispersión de una plaga por efecto del abastecimiento comercial de productos vegetales infectados se ha estudiado en [69] estableciendo distribuciones de probabilidades para nueve variables de las cuales se establece una probabilidad conjunta para el riesgo de dispersión de la plaga al recibir productos vegetales de otras regiones que pudieran estar infectados. Muestra la pertinencia del modelo con tres plagas en la Unión Europea.

Una evaluación de los modelos de distribución de especies para el caso de especies en expansión se puede encontrar en [60] usándolo para la predicción de la expansión de seis especies de ciervos en el Reino Unido utilizando variables climáticas (máxima temperatura del mes más caliente, mínima temperatura del mes más frío, precipitación anual, etc), topográficas (altitud media y máxima, pendiente, etc) y espaciales (latitud y longitud).

En resumen, los modelos de distribución de especies (SDM Species distribution models) son representaciones de la idoneidad de un espacio para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación [49]. Estas variables pueden ser geológicas, topográficas o climáticas, se encuentra en constante evolución y caracterización con diferentes tipos de técnicas estadísticas y/o descriptivas con diversas aplicaciones, entre ellas sobre el riesgo de especies invasoras. Aspectos vinculados a la recolección de datos para la validación de los modelos, cantidad de variables involucradas, e incluso, los efectos de la deforestación y cambio climático hacen que no sea posible proponer fácilmente modelos de expansión o colonización de territorios o extinción de especies.

En la presente tesis, a los efectos de no adentrarnos en un área extensa y en desarrollo, se ha optado por utilizar un modelo basado en la distancia y un factor que caracteriza la especie en expansión.

¹La diapausa [20] es un retraso en el desarrollo que se produce en respuesta a períodos recurrentes regulares de condiciones ambientales adversas.

3. Optimización estocástica

La *programación lineal* permite encontrar los valores de un conjunto de variables de decisión reales que cumpliendo con un conjunto de restricciones lineales entregan un valor óptimo para una función lineal denominada función objetivo.

$$(1) \quad \begin{array}{ll} \text{mín} & c^t x \\ \text{sujeto a} & Ax = b \\ & X \leq 0 \end{array}$$

Los supuestos de la *programación lineal*, mencionados en textos como [22], [38] y en documentos fundacionales como [26] son:

- **Proporcionalidad:** el aporte de cada variable al valor de la función objetivo es proporcional a su magnitud.
- **Aditividad:** cada expresión de un modelo de programación lineal es la suma de las aportaciones individuales de sus variables.
- **Divisibilidad:** Los valores que toman las variables de decisión no necesariamente deben ser enteros sino que pertenecen a un conjunto denso.
- **Certidumbre:** Las cantidades (parámetros) que acompañan a las variables de decisión o son términos independientes de las expresiones, son valores ciertos y conocidos.

Es usual encontrar aplicaciones en las cuales uno o varios de los parámetros que participan en el modelo no se conocen con certeza y se encuentran sujetos a incertidumbre. Valores como precios de bienes, demandas de productos, rendimientos de cultivos, por decir algunos, no se conocen con certeza al momento de modelar el problema.

La *programación lineal estocástica* (SLP) [25, 63] supone que uno o varios de los componentes del modelo se encuentran sujetos a aleatoriedad con una distribución de probabilidades conocida.

Formalmente, ([14]) en la optimización estocástica se tiene un conjunto de “decisiones de primera etapa” (X) que se deben tomar antes de que se genere un conjunto de eventos aleatorios, representado por un vector (ξ). Con posterioridad se recibe la información sobre los resultados mediante la realización de los eventos del vector (ξ) y, sobre la base de esta realización, se toman acciones correctivas que podemos llamar “acciones de segunda etapa” (Y). Se supone conocida la distribución de probabilidades de los eventos aleatorios.

En este contexto, el modelo a resolver que optimiza el valor esperado es el siguiente:

$$(2) \quad \begin{array}{ll} \text{mín} & c^t x + E(Q(x, \xi)) \\ \text{sujeto a} & Ax = b \\ & X \geq 0 \end{array}$$

En donde

$$(3) \quad \begin{array}{ll} & Q(x, \xi) = \text{mín } q^t \\ \text{sujeto a} & Wy = h - Tx \\ & y \geq 0 \end{array}$$

El vector ξ está formado por q^T, h^T, T .

Ejemplo 1:

Como ejemplo se puede considerar un producto localizado en una fábrica que debe ser despachado a un punto de venta y se debe decidir la cantidad enviar. Claramente, si **no** tuviéramos incertidumbre en la demanda del producto el problema sería determinista.

Ahora, supongamos que el punto de venta debe ser reabastecido durante la noche con la cantidad necesaria para satisfacer la demanda incierta del día siguiente a un costo de c_1 por unidad. El producto faltante durante el día se puede solicitar con modo urgente con un costo $c_2 > c_1$ por unidad, y se sabe que la demanda d es un valor que surge de una distribución uniforme comprendida entre a y b . La cantidad disponible en la fábrica es $f > b$.

El modelo que minimiza el costo de distribución se puede expresar como:

$$(4) \quad \begin{array}{ll} \text{mín} & z = c_1x_1 + c_2x_2 \\ \text{sujeto a} & x_1 \leq f \\ & x_1 + x_2 = d \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{array}$$

Con

- x_1 : cantidad a despachar desde la fábrica en condiciones normales durante la noche,
- x_2 : cantidad a enviar durante el día en forma urgente,
- c_1 : costo unitario del envío en condición normal,
- c_2 : costo unitario del envío en condición urgente,
- d : demanda del producto, es una variable aleatoria con distribución uniforme comprendida entre a y b ,
- f : cantidad disponible para realizar el envío nocturno en condición normal superior a la cota máxima de la demanda $f > b$,
- z : costo de distribución de la venta diaria.

La decisión a tomar es ¿Cuál es la cantidad óptima a despachar durante la noche en condición normal de tal forma de minimizar el costo de distribución?

El valor de z graficado en la Figura ?? se obtiene con tres expresiones distintas dependiendo del valor x_1 :

Si la cantidad a despachar desde la fábrica durante la noche es inferior a la demanda mínima $x_1 < a$ el valor de distribución de la venta diaria z se puede obtener mutiplicando la cantidad a despachar desde la fábrica durante la noche por el costo unitario del despacho nocturno al cual le sumamos la diferencia entre la demanda d del día y la cantidad a despachar desde la fábrica durante la noche x_1 multiplicándolo por el costo unitario del envío urgente c_2 , es decir

$$(5) \quad z = c_1 x_1 + (d - x_1) c_2 = c_1 x_1 + d c_2 - x_1 c_2 = d c_2 - x_1 (c_2 - c_1).$$

Recordando que la demanda diaria d es una variable aleatoria que se distribuye uniformemente entre a y b , el valor esperado de la demanda $E(d)$ se puede calcular como:

$$(6) \quad E(d) = \frac{a + b}{2}.$$

Con lo cual, el valor esperado del costo de distribución de la venta diaria $E(z)$ en el caso en que la cantidad a despachar desde la fábrica durante la noche sea inferior al límite inferior de la demanda es:

$$(7) \quad \begin{aligned} E(z) &= E(d)c_2 - x_1(c_2 - c_1) \\ E(z) &= \left(\frac{a + b}{2}\right)c_2 - x_1(c_2 - c_1). \end{aligned}$$

Cuando la cantidad a despachar desde la fábrica en condiciones normales se encuentra entre los límites inferiores y la demanda $a \leq x_1 \leq d$ el costo de distribución diaria z también se puede calcular con la expresión (5).

En tanto si la cantidad a despachar desde la fábrica en condiciones normales se encuentra entre la demanda y el extremo superior de la demanda $d < x_1 \leq b$, el costo de distribución diaria z se puede calcular como

$$(8) \quad z = x_1 c_1.$$

Ahora bien, el valor esperado del costo de distribución diaria z para cuando la cantidad a despachar desde la fábrica en condiciones normales se encuentra dentro de los límites establecidos para la demanda $a \leq x \leq b$ se puede obtener del siguiente modo:

$$(9) \quad E(z) = (dc_2 - x_1(c_2 - c_1))P(d \geq x_1) + x_1c_1P(d < x_1).$$

Dado que la demanda d es una variable aleatoria con distribución uniforme entre a y b , el valor esperado de d se obtiene con la expresión (6). Además, las probabilidades incluidas en (9) se pueden calcular con:

$$(10) \quad P(d \geq x_1) = \frac{b - x_1}{b - a}$$

$$(11) \quad P(d < x_1) = \frac{x_1 - a}{b - a}.$$

Entonces, la expresión (9) se puede reescribir como

$$(12) \quad E(z) = \left(\frac{a+b}{2}c_2 - x_1(c_2 - c_1)\right)\frac{b - x_1}{b - a} + x_1c_1\frac{x_1 - a}{b - a}.$$

Operando con el primer término de la expresión (12), obtenemos

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{a+b}{2}c_2 - x_1(c_2 - c_1)\right) \frac{b-x_1}{b-a} & = \\
& \left(\frac{b-x_1}{b-a} \frac{a+b}{2}c_2 - x_1(c_2 - c_1) \frac{b-x_1}{b-a}\right) & = \\
& \frac{(b-x_1)(a+b)c_2 - 2x_1(c_2 - c_1)(b-x_1)}{2(b-a)} & = \\
& \frac{c_2(ab + b^2 - ax_1 - bx_1) - 2x_1(bc_2 - c_2x_1 - bc_1 + c_1x_1)}{2(b-a)} & = \\
& \frac{abc_2 + b^2c_2 - ac_2x_1 - bc_2x_1 - 2bc_2x_1 + 2c_2x_1^2 + 2bc_1x_1 - 2c_1x_1^2}{2(b-a)} & = \\
(13) \quad & \frac{2x_1^2(c_2 - c_1) - x_1(ac_2 + 3bc_2 - 2bc_1) + (abc_2 + b^2c_2)}{2(b-a)}.
\end{aligned}$$

Operando con el segundo término de la expresión (12), tenemos

$$(14) \quad x_1 c_1 \frac{x_1 - a}{b - a} = \frac{2c_1 x_1^2 - 2a c_1 x_1}{2(b - a)}.$$

Teniendo en cuenta (13) y (14), el valor esperado del costo de distribución de la venta diaria $E(z)$ cuando la cantidad enviada en forma normal x_1 se encuentra comprendida entre los extremos de la demanda diaria $a \leq x_1 \leq b$ se puede expresar como

$$(15) \quad E(z) = \frac{2c_2x_1^2 - x_1(ac_2 + 3bc_2 - 2bc_1 + 2ac_1) + (abc_2 + b^2c_2)}{2(b-a)}.$$

Para el tercer y último caso, cuando la cantidad despachada en forma normal desde la fábrica es superior al límite superior de la demanda $x_1 > b$, el valor esperado del costo de distribución de la venta diaria es

$$(16) \quad E(z) = c_1 x_1.$$

Resumiendo (7), (9) y (16), el costo de distribución esperado de la venta diaria se puede expresar como la siguiente función por trozos:

$$(17) \quad E(z) = \begin{cases} \left(\frac{a+b}{2}\right)c_2 - x_1(c_2 - c_1) & \text{si } x_1 < a, \\ \frac{2c_2x_1^2 - x_1(ac_2 + 3bc_2 - 2bc_1 + 2ac_1) + (abc_2 + b^2c_2)}{2(b-a)} & \text{si } a \leq x_1 \leq b, \\ c_1x_1 & \text{si } x_1 > b. \end{cases}$$

El primer trozo de la función (17) es decreciente, ya que $c_2 > c_1$ y además, todas las cantidades que participan en la expresión son mayores que cero a excepción que la cantidad a despachar en forma normal que podría ser cero $a, b, c_1, c_2 > 0$ y $x_1 \geq 0$. El último trozo es creciente ya que $c_1 > 0$, por lo tanto, el mínimo del valor esperado de costo de distribución se encuentra para valores $x_1 \in [a, b]$ en donde $E(z)$ viene definido por una función convexa.

Si planteamos

$$(18) \quad 0 = \frac{dE(z)}{dx_1} = \frac{4c_2x_1 - (ac_2 + 3bc_2 - 2bc_1 + 2ac_1)}{2(b-a)}.$$

Tenemos que el valor mínimo de $E(z)$ se tiene para el valor de x_1 (x_1^*) que surge de

$$(19) \quad x_1^* = \frac{ac_2 + 3bc_2 - 2bc_1 + 2ac_1}{4c_2}.$$

Para asegurar que se trata de un mínimo se debe cumplir que

$$(20) \quad 0 < \frac{d^2E(z)}{dx_1^2} = \frac{4c_2}{2(b-a)}.$$

Dado que $c_2 > 0$ y $b > a$ la expresión (20) se cumple y el valor x_1^* es el mínimo de la función por trozos (17).

Observando la formulación (4), se ve que el problema consiste en determinar el valor de la cantidad a enviar durante la noche en forma normal (x_1) antes de conocer el valor real de la demanda (d) que se producirá durante el próximo día laboral y en ese momento se conoce una cota inferior para el costo de distribución (z). Ahora, bien, al día siguiente, cuando se conoce el valor correcto de la demanda producida, se asigna un valor a la cantidad a despachar en modalidad urgente (x_2) con el correspondiente ajuste en el valor del costo de distribución (z).

Generalizando, la programación lineal estocástica (SLP) supone que uno o varios de los componentes del modelo se encuentran sujetos a aleatoriedad (en el ejemplo, la demanda es el elemento aleatorio). Además, algunas de las variables de decisión pueden tomar un valor independiente del resultado de los procesos aleatorios (a priori, como por ejemplo, la cantidad a despachar durante la noche en forma normal), y otras pueden tomar valores distintos dependiendo de la realización ocurrida de los procesos, y la función a optimizar refiere a la optimización del valor esperado.

En el ejemplo desarrollado (4) la variable aleatoria demanda (d) se distribuye en forma uniforme entre dos valores a y b . Cuando la variable aleatoria se distribuye de acuerdo a una distribución de probabilidades discreta el problema pasa a denominarse como *Programación lineal estocástica discreta* (DSLSP), ver ([23]).

Previo a la formulación del problema de *programación lineal estocástica discreta* se determina la *distribución de probabilidad*

$$(21) \quad \begin{aligned} \text{Prob}[(c, A, b) = (c, A, b)_k] &= p_k \quad (k = 1, 2, \dots, K), \\ \sum_{k=1}^K p_k &= 1. \end{aligned}$$

Se denomina *escenario* a cada una de las K ternas $((c, A, b)_k)$ de un total de K posibles, cada uno de ellos contiene una probabilidad de ocurrencia asociada p_k .

Contemplando las variables aleatorias discretas y optimizando el valor esperado, el modelo (2) se puede reformular como:

$$(22) \quad \begin{aligned} & \text{mín} \quad c^t x + \sum_{k=1}^K p_k q_k^t y_k \\ & \text{sujeto a} \\ & T_k x + W_k y_k = h_k \quad k = 1, \dots, K \\ & Ax = b \\ & x \geq 0 \\ & y_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, K \end{aligned}$$

En donde q , T , W , h dependen del escenario.

Ejemplo 2:

Basados en el ejemplo (4) se define otro ejemplo de *modelo de demanda discreta* estableciendo que la demanda puede tomar, en forma aleatoria, dos valores posibles. Una cantidad demandada d_1 con probabilidad de ocurrencia p y otra d_2 con probabilidad de ocurrencia $(1-p)$, claramente, el valor de la cantidad a enviar en el día con modalidad urgente (x_2) va a depender de cuál de los dos escenarios se presente. Teniendo en cuenta (22), el modelo queda:

$$(23) \quad \begin{aligned} & \text{mín} \quad z = c_1 x_1 + c_2 x_2^1 p + c_2 x_2^2 (1-p) \\ & \text{sujeto a} \\ & x_1 \leq f \\ & x_1 + x_2^1 = d^1 \\ & x_1 + x_2^2 = d^2 \\ & x_1, x_2^1, x_2^2 \geq 0 \end{aligned}$$

Generalizando, si la variable aleatoria demanda (d) se determina sobre un espacio de soluciones discreto, finito y cuantificable de tal forma que existe un vector $D = \{d_1, \dots, d_k, \dots, d_K\}$ con los valores posibles de la variable d , y otro vector $P = \{p_1, \dots, p_k, \dots, p_K\}$ con cada una de las probabilidades de ocurrencia tal que $\sum_{k=1}^K p_k = 1$, el modelo de ejemplo queda:

$$(24) \quad \begin{aligned} \text{mín} \quad z &= c_1 x_1 + c_2 \sum_{k=1}^K x_2^k p_k \\ \text{sujeto a} \\ x_1 &\leq f \\ x_1 + x_2^k &= d^k \quad k = 1, \dots, K \\ x_1, x_2^k &\geq 0 \end{aligned}$$

4. Optimización robusta

Una alternativa para abordar los modelos en los cuales uno o más parámetros tienen valores inciertos es mediante la *optimización robusta* ([13]), que busca la mejor solución posible contemplando los valores de dichos parámetros, sin identificar una determinada distribución de probabilidad.

Esta técnica fue utilizada en diversos problemas vinculados a la gestión logística y de inventarios ([12]), ([11]), ([41]), ([44]) y ([75]) e incluso en abastecimiento continuo como la provisión de agua ([42]).

En contraposición a la *optimización estocástica*, que requiere conocer la distribución de probabilidades asociadas a esos parámetros, la *optimización robusta* aborda la variabilidad de estos parámetros sin apelar a su distribución de probabilidades sino que los diferentes valores que pueden tomar los parámetros inciertos asociados a restricciones *fuertes* se encuentran determinados por un *conjunto de*

incertidumbre ([10]). La función objetivo lleva habitualmente, a optimizar el peor caso que se pueda presentar.

Distintos tipos de optimización robusta se diferencian por las características del conjunto de incertidumbre.

Sea

$$(25) \quad \begin{aligned} \text{mín} \quad z &= c^t x \\ \text{sujeto a} \\ Ax &\geq 0 \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

En donde el vector c corresponde a valores fijos no sometidos a incertidumbre, en cambio la matriz A de $m \times n$ es un miembro del conjunto de incertidumbre U conformado por un conjunto de matrices que contienen $m \times n$ elementos.

Se puede construir la *contraparte robusta* de (25) como:

$$(26) \quad \begin{aligned} \text{mín} \quad z &= c^t x \\ \text{sujeto a} \\ Ax &\geq 0 \quad \forall A \in U \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Una solución robusta debe satisfacer a todas las realizaciones del conjunto U con el mejor valor de la función objetivo, esta solución tiende a ser conservadora dado que busca la mejor solución que satisfaga adecuadamente a todos los elementos del conjunto de incertidumbre U .

Ejemplo 3:

Un ejemplo basado en ([10]) es:

$$\begin{aligned}
 (27) \quad & \text{mín} \quad z = x_1 + x_2 \\
 & \text{sujeto a} \\
 & ax_1 + x_2 \geq 1 \\
 & x_1 + bx_2 \geq 1 \\
 & x_1 + x_2 = 1 \\
 & x_1 \geq 0 \\
 & x_2 \geq 0 \\
 & U = \{(a, b) \in \mathbb{R}^2 : a + b = 2\}
 \end{aligned}$$

Para todos los valores de U hay solución óptima con valor mínimo 1. Como se puede ver en la Figura [1.2], si $a = b = 1$ toda la recta $x_1 + x_2 = 1$ con valores de x_1 y x_2 no negativos es solución óptima del modelo, en cambio si, $a < 1$ entonces $b > 1$ y la solución es $x_1 = 0$ $x_2 = 1$. En cambio si $a > 1$ entonces $b < 1$ y la solución es $x_1 = 1$ y $x_2 = 0$.

Si bien la formulación robusta aborda el problema de la variabilidad sin determinar la distribución de probabilidades que la representa, se han realizado trabajos ([12]) que contemplan estadísticos de esa variabilidad con independencia de su distribución, como ser su media, su desvío estándar y/o la semi-amplitud.

En estas formulaciones se suele incorporar un parámetro Γ que indica la variabilidad acumulada permisible para la solución hallada.

Ejemplo 4:

Como ejemplo, basado en [12], consideremos el siguiente modelo de stock multiperíodo (T períodos). Sea para $k = 0, \dots, T - 1$:

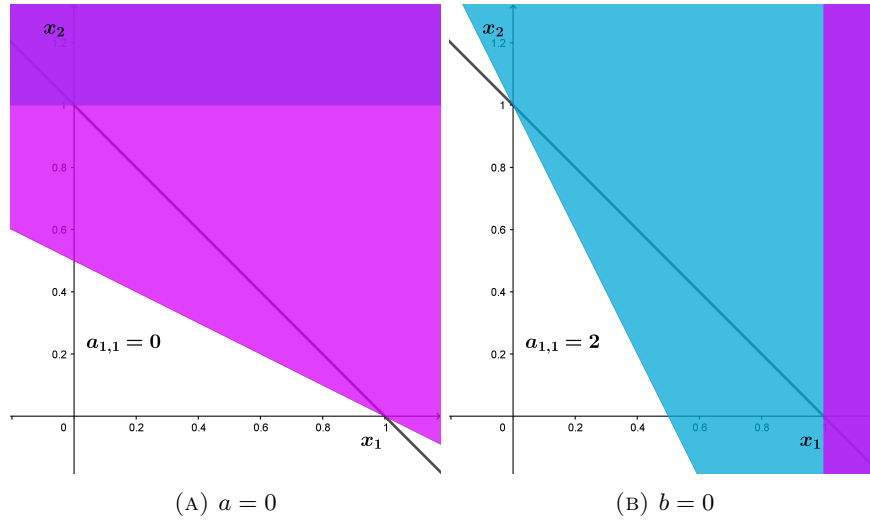


FIGURA (1.2). Región factible.

- x_k : stock disponible al comienzo del período k ,
- u_k : pedidos solicitados al comienzo del período k , éstos son ingresados al stock durante el período k ,
- w_k : Demanda durante el período k .

La evolución del stock se establece como

$$(28) \quad x_{k+1} = x_k + u_k - w_k = x_0 + \sum_{i=0}^k u_i - w_i, \quad \forall k = 0, \dots, T-1.$$

La demanda de cada período w_k es una variable aleatoria de la cual se conoce un intervalo en el cual se encuentra su valor, expresado por su punto central \bar{w}_k y semiamplitud \hat{w}_k ,

$$(29) \quad w_k \in [\bar{w}_k \pm \hat{w}_k] \quad \forall k = 0, \dots, K.$$

Sobre ese intervalo se define la variación relativa $z_k \in [-1; 1]$ que se obtiene como

$$(30) \quad z_k = \frac{w_k - \bar{w}_k}{\hat{w}_k}.$$

Como parámetro de robustez Γ_k se establece una cota superior a las variaciones relativas acumuladas hasta el período k , de tal forma que

$$(31) \quad \sum_{i=0}^k |z_i| = \sum_{i=0}^k \left| \frac{w_i - \bar{w}_i}{\hat{w}_i} \right| \leq \Gamma_k \quad \forall \quad k = 0, \dots, K.$$

Resta plantear el cálculo del costo, compuesto por dos elementos: por un lado el costo de compra ($C(u)$) y por otro, el de las penalidades ($R(x)$) correspondientes al almacenamiento de un unidad no demandada h y el costo de la demanda de una unidad que no puede ser satisfecha por falta de inventario p .

El costo de compra es de la forma

$$(32) \quad C(u) = \begin{cases} K + cu & \text{si } u > 0, \\ 0 & \text{si } u = 0. \end{cases}$$

En esta expresión c es el costo unitario de compra y K es el costo fijo de realizar una operación de compra independiente de la cantidad u de unidades adquiridas.

En cuanto a ambas penalidades, tanto el costo unitario de almacenamiento h como el costo unitario de demanda insatisfecha p son no negativos y asumiendo que $p > c$ dado que preferimos comercializar el producto, se puede definir la función de costo de almacenamiento / demanda insatisfecha como

$$(33) \quad R(x) = \text{máx} \{hx, -px\}.$$

Teniendo en cuenta (28), (32), y (33), el problema de stock se puede plantear como

$$(34) \quad \text{mín } z = \sum_{k=0}^{T-1} (cu_k + Kv_k + y_k)$$

sujeto a

$$(35) \quad y_k \geq h(x_0 + \sum_{i=0}^k (u_i - w_i)) \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$(36) \quad y_k \geq -p(x_0 + \sum_{i=0}^k (u_i - w_i)) \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$(37) \quad w_i = \bar{w}_i + z_i \hat{w}_i, \quad \forall i = 0, \dots, T-1,$$

$$0 \leq u_k \leq \mathcal{M}v_k, \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$\sum_{i=0}^k |z_i| \leq \Gamma_k, \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$v_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$z_i \in \{-1, 1\}, \quad \forall i = 0, \dots, T-1.$$

Con: \mathcal{M} un valor numérico alto y v_k es una variable binaria cuyo valor 1 indica que se debe realizar una compra en el período k .

En tanto, la ecuación (35) representa el excedente de stock en el período k y la ecuación (36) hace referencia a la penalidad por demanda insatisfecha en el período k .

La robustez queda expresada por el parámetro Γ_k , que determina la máxima desviación relativa acumulada de las realizaciones de la demanda que se encuentran contempladas en el modelo.

Los mayores z_i permitidos por los parámetros de robustez Γ_k se pueden determinar resolviendo el problema auxiliar (38), para cada uno de los períodos $k = 0, \dots, T-1$.

$$(38) \quad \begin{aligned} \text{máx} \quad z &= \sum_{i=0}^k \hat{w}_i z_i \\ \text{sujeto a} \quad & \\ & \sum_{i=0}^k z_i \leq \Gamma_k \\ & 0 \leq z_i \leq 1 \end{aligned}$$

Con dual para cada $k = 0, \dots, T-1$

$$(39) \quad \begin{aligned} \text{mín} \quad z &= \Gamma_k q_k + \sum_{i=0}^k r_{i,k} \\ \text{sujeto a} \quad & \\ & q_k + r_{i,k} \geq \hat{w}_i \quad \forall i \leq k \end{aligned}$$

Si z_i^* es el óptimo del problema primal (38) para un período $k = 0, \dots, T-1$ y $q_k^*, r_{i,k}^*$ los valores óptimos del problema dual para un período $k = 0, \dots, T-1$, por la propiedad de la dualidad fuerte

$$(40) \quad \sum_{i=0}^k \hat{w}_i z_i^* = \Gamma_k q_k^* + \sum_{i=0}^k r_{i,k}^*.$$

Como se puede ver en (12) teniendo en cuenta las expresiones (34), (38), (39) y (40), la formulación para una sola estación de inventarios para $k = 0, \dots, T-1$ aplicando el concepto robusto, queda como

(41)

$$\text{mín } z = \sum_{k=0}^{T-1} (cu_k + Kv_k + y_k)$$

sujeto a

(42)

$$y_k \geq h \left(x_0 + \sum_{i=0}^k (u_i - \bar{w}_i) + q_k \Gamma_k + \sum_{i=0}^k r_{i,k} \right) \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

(43)

$$y_k \geq -p \left(x_0 + \sum_{i=0}^k (u_i - \bar{w}_i) - q_k \Gamma_k - \sum_{i=0}^k r_{i,k} \right) \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$q_k + r_{i,k} \geq \hat{w}_i \quad \forall k = 0, \dots, T-1, \forall i \leq k,$$

$$q_k \geq 0 \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$r_{i,k} \geq 0 \quad \forall k = 0, \dots, T-1, \forall i \leq k,$$

$$0 \leq u_k \leq \mathcal{M}v_k, \quad \forall k = 0, \dots, T-1,$$

$$v_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k = 0, \dots, T-1.$$

Con \mathcal{M} un valor numérico alto.

Las variables q_k y $r_{i,k}$ del modelo determinan la semi-amplitud proporcional z_i para cada uno de los períodos $i \leq k$ que se contemplan en la restricciones de excedente de stock (42) y de demanda insatisfecha (43).

Estos valores z_i se pueden obtener vinculando el subproblema (38) con la expresión de la propiedad de dualidad fuerte (40). Cabe recordar que estos valores dependen el parámetro de robustez Γ_k siendo independientes de las magnitudes de las penalidades correspondientes excedente de stock h y de demanda insatisfecha p las cuales impactan sobre los valores de las unidades a comprar en cada período u_k .

Como ejercicio numérico se considera un producto durante tres períodos cuyas demandas son variables en un intervalo definido por su punto medio y su semi-amplitud. Se establece el parámetro de robustez Γ para cada período (ver Cuadro 1.1).

Período (k)	Demanda		Γ_k
	Punto Medio (\bar{w}_k)	Semi-amplitud (\hat{w}_k)	
0	200	75	0.4
1	300	100	0.9
2	250	150	1.5

CUADRO (1.1). Demandas por período con su parámetro Γ

Tomamos como costo unitario de compra una unidad ($c = 1$), como costo de realizar una compra dos unidades ($K = 2$), y el stock inicial al comienzo del período 0 en 100 unidades ($x_0 = 100$).

La penalidad por demanda insatisfecha es de tres unidades ($p = 3$), y por último, el costo de mantener una unidad en stock es de 0.1 unidades ($h = 0.1$), el modelo queda formulado como indica el Cuadro 1.2

La compra óptima para este nivel de robustez es

$$\{u_0, u_1, u_2\} = \{128.06, 356.13, 352.90\}.$$

Tomando la decisión de compra de las cantidades óptimas se tienen los resultados que se observan en el Cuadro 1.3 para determinadas realizaciones de demanda, en el primer caso (Columna A) la realización de la demanda es superior a la media de cada período, en el siguiente (Columna B) la realización de la demanda corresponde a la demanda media, y por último (Columna C) se toma una instancia en la cual la realización de la demanda es inferior al promedio para los tres períodos. En el renglon Costo Total del cuadro se puede observar el costo que se produce para cada instancias.

En el Cuadro 1.4 se pueden observar los costos resultantes para dos políticas de compra diferentes a la óptima, una con compras inferiores a la hallada y otra con

$$\begin{array}{ll}
\min & u_0 + u_1 + u_2 + 2v_0 + 2v_1 + 2v_2 + y_0 + y_1 + y_2 \\
\text{Sujeto a} & \\
y_0 & \geq -10 + 0.1u_0 + 0.04q_0 + 0.1r_{0,0} \\
y_0 & \geq 300 - 3u_0 + 1.2q_0 + 3r_{0,0} \\
y_1 & \geq -40 + 0.1u_0 + 0.1u_1 + 0.09q_1 + 0.1r_{0,1} + 0.1r_{1,1} \\
y_1 & \geq 1200 - 3u_0 - 3u_1 + 2.7q_1 + 3r_{0,1} + 3r_{1,1} \\
y_2 & \geq -65 + 0.1u_0 + 0.1u_1 + 0.1u_2 + 0.15q_2 + 0.1r_{0,2} + 0.1r_{1,2} + 0.1r_{2,2} \\
y_2 & \geq 1950 - 3u_0 - 3u_1 - 3u_2 + 4.5q_2 + 3r_{0,2} + 3r_{1,2} + 3r_{2,2} \\
q_0 + r_{0,0} & \geq 75 \\
q_1 + r_{0,1} & \geq 75 \\
q_1 + r_{1,1} & \geq 100 \\
q_2 + r_{0,2} & \geq 75 \\
q_2 + r_{1,2} & \geq 100 \\
q_2 + r_{2,2} & \geq 150 \\
0 & \leq u_0 \leq \mathcal{M}v_0 \\
0 & \leq u_1 \leq \mathcal{M}v_1 \\
0 & \leq u_2 \leq \mathcal{M}v_2 \\
v_i & \in \{0, 1\} \quad i = 0, 1, 2 \\
y_i & \geq 0 \quad i = 0, 1, 2 \\
q_i & \geq 0 \quad i = 0, 1, 2 \\
r_{i,j} & \geq 0 \quad (i, j) \in \{(0, 0), (0, 1), (1, 1), (0, 2), (1, 2), (2, 2)\}
\end{array}$$

CUADRO (1.2). Formulación del problema ejemplo

Período	Compra	Demandas		
		A	B	C
0	128.06	220.00	200.00	180.00
1	356.13	350.00	300.00	250.00
2	352.90	350.00	250.00	150.00
Costo total		846.13	872.13	898.13

CUADRO (1.3). Costos para tres instancias con la compra óptima

compras superiores. Se puede ver que las políticas de compra diferentes a la óptima entregan un valor de costo superior al que corresponde a la política de compra óptima con excepción de la realización de demanda inferiores a la media (Columna C) con la política de compra inferior a la óptima.

Se observa el efecto que produce en la solución óptima la variación del parámetro de robustez Γ , al hacerlo cero, $\{\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2\} = \{0, 0, 0\}$ la compra óptima es aquella que cubre la demanda media de cada período, en cambio, haciendo el parámetro de robustez máximo $\{\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2\} = \{1, 2, 3\}$ se considera toda la variabilidad de la

Período	Política de Compra			Instancias		
	0	1	2	A	B	C
Óptima	128.06	356.13	352.90	846.13	872.13	898.13
Inferior	100.00	200.00	100.00	2236.00	1456.00	738.00
Superior	150.00	400.00	400.00	980.00	1006.00	1032.00

CUADRO (1.4). Comparación de Costos con diferentes políticas de compra

demanda de cada período obteniendo una solución con valor de función objetivo superior al de los demás valores del parámetro de robustez.

En el Cuadro [1.5](#) se puede ver cómo varía la solución óptima a medida que incrementamos el valor del parámetro de robustez, tendiendo a comprar más para encontrar la mejor solución para un rango de variación cada vez mayor.

Variante:	1	2	3	4	5
Período (k)	Γ_k				
1	0.00	0.20	0.40	0.80	1.00
2	0.00	0.40	0.90	1.60	2.00
3	0.00	0.80	1.50	2.20	3.00
Período (k)	Compra Óptima (u_k)				
1	100.00	114.03	128.06	165.13	170.16
2	300.00	323.39	356.13	379.52	393.55
3	250.00	324.93	352.90	362.25	390.32
z	656.00	802.13	905.03	994.87	1071.32

CUADRO (1.5). Versiones con diferentes niveles de robustez

En resumen, la *optimización robusta* incorpora restricciones que permiten contemplar la variabilidad de algunos de los parámetros del modelo con prescindencia de la distribución de probabilidades que determinan el comportamiento de su variación. La solución hallada corresponde a la mejor solución posible teniendo en cuenta la máxima variabilidad permitida determinada por un parámetro.

5. Generación de escenarios

Los modelos de optimización estocástica (ver Sección 3 de este capítulo) son, en general, difíciles de resolver. Una dificultad viene dada por la identificación de los diferentes valores que pueden tomar los parámetros inciertos.

Una herramienta es la definición de uno o mas *escenarios* que establezcan los valores, o sus características, de aquellos parámetros inciertos.

Un enfoque es caracterizar los valores de un parámetro mediante una distribución de probabilidades ya sea continua o discreta. En esta tesis nos concentraremos en una distribución discreta ([45]), con lo que cada uno de los escenarios determinará el valor de un parámetro con una probabilidad de ocurrencia asociada.

Una herramienta utilizada para la evaluación de escenarios es el *árbol de escenarios*, que grafica el conjunto de escenarios que se consideran en el modelo de optimización.

5.1. Árbol de escenarios.

Supongamos un problema de planificación de la compra de un producto para su posterior comercialización durante un conjunto de períodos cuya demanda es incierta. Cada período contiene un conjunto de estados, cada uno de ellos contempla una realización de la demanda que se produce en ese período. Debemos decidir la cantidad óptima a adquirir en el instante inicial y el programa de entregas de los productos a comercializar durante los períodos posteriores.

Ejemplo 5:

Como ejemplo consideremos un momento inicial en el cual se debe tomar la decisión de la cantidad a comprar y tres períodos en los cuales se comercializa el producto. Junto la decisión inicial se debe determinar la cantidad que debe ser entregada por el proveedor al comienzo de cada período, el cual posee dos estados posibles, uno *optimista* y otro *pesimista*.

Estado	Unidades Demandadas	Probabilidad	
		Optimista	Pesimista
Optimista	9	0.7	0.3
Pesimista	5	0.3	0.7

CUADRO (1.6). Probabilidades y demandas en cada período.

En el Cuadro [1.6](#) se pueden observar las pautas que caracterizan el evento aleatorio que se produce en cada período. Si la demanda es catalogada como “Pesimista” se solicitarán cinco unidades, en cambio si es “Optimista” estas serán nueve unidades. La probabilidad de que la demanda en un período sea catalogada como “Pesimista” dependerá de la demanda producida en el período anterior describiendo la matriz de transición de una cadena de Markov ([38](#)). En base a esta información en la Figura [1.3](#) se observa el árbol de escenarios correspondiente.

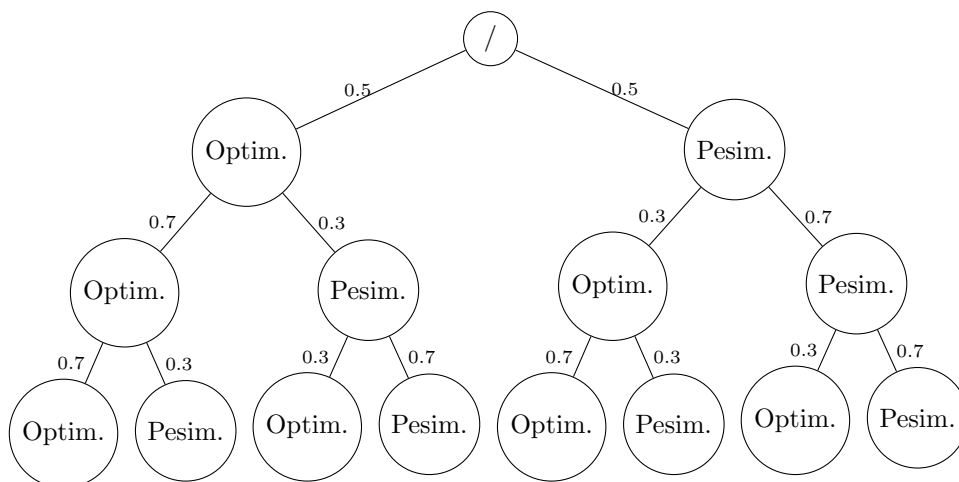


FIGURA (1.3). Árbol de escenarios.

A partir del nodo raíz cada nivel del árbol de escenarios representa un período, los nodos son los diferentes estados que surgen del proceso aleatorio y los arcos son etiquetados con la probabilidad condicional (con excepción de los arcos que se dirigen al primer nivel, que se etiquetan con las probabilidades del estado estable de la cadena de Markov (ver [38](#))). Los escenarios posibles son los que se observan en la Tabla [1.7](#)

Escenario	Demanda del período			Probabilidad de ocurrencia
	1	2	3	
1	Optimista (9)	Optimista (9)	Optimista (9)	0.245
2	Optimista (9)	Optimista (9)	Pesimista (5)	0.105
3	Optimista (9)	Pesimista (5)	Optimista (9)	0.045
4	Optimista (9)	Pesimista (5)	Pesimista (5)	0.105
5	Pesimista (5)	Optimista (9)	Optimista (9)	0.105
6	Pesimista (5)	Optimista (9)	Pesimista (5)	0.045
7	Pesimista (5)	Pesimista (5)	Optimista (9)	0.105
8	Pesimista (5)	Pesimista (5)	Pesimista (5)	0.245

CUADRO (1.7). Conjunto de escenarios.

Ciertamente, considerar solamente dos estados posibles para cada período es poco aplicable a problemas reales. Habitualmente se puede realizar un estudio con elementos de estadística descriptiva que permita caracterizar la variabilidad de la demanda en cada período y con ellos establecer un mecanismo de generación de valores que permita simular esa variabilidad.

Se pueden ver en [19] algunos ejemplos del uso de los árboles de escenarios en la optimización estocástica.

5.2. Métodos de Montecarlo.

Los métodos de Montecarlo² se basan en la analogía entre probabilidad y volumen ([34]), al asociar un evento con un conjunto de resultados y definir su probabilidad como un volumen o medida relativa de casos favorables respecto del universo de casos posibles.

Los métodos de Montecarlo usan la definición a la inversa, calculando un volumen y asociando ese volumen con su probabilidad. En su expresión más simple, significa tomar muestras al azar de un universo de posibles resultados y tomar la porción de sorteos aleatorios que caen en el subconjunto de los casos posibles que sean de interés. La ley de los grandes números asegura que esta estimación converge al valor correcto a medida que aumenta el número de muestras realizadas.

²El término Montecarlo se suele encontrar en la bibliografía escrito como Monte Carlo o Montecarlo, esta última versión es la utilizada en el sitio oficial de Principado de Mónaco.

Ejemplo 6:

Por ejemplo para obtener una estimación de $\int_0^1 x^2 dx$ se puede evaluar la función, en este caso x^2 , con n extracciones de valores entre 0 y 1 distribuidos uniformemente. Una estimación de la integral surge de promediar las n evaluaciones.

Cantidad de Muestras	Valor de la Integral
10^1	0.22124
10^2	0.30462
10^3	0.32708
10^4	0.33553
10^5	0.33323
10^6	0.33351
10^7	0.33342
10^8	0.33327
10^9	0.33334

CUADRO (1.8). Cálculo de $\int_0^1 x^2 dx$ por el método de Montecarlo.

En el Cuadro [1.8](#) se puede ver que, a medida que se incrementa la cantidad de muestras que se utilizan para evaluar la función, al promediar sus resultados, nos acercamos el verdadero valor de $\int_0^1 x^2 dx = \frac{1}{3}$.

Ejemplo 7:

En el ejemplo del Cuadro [1.7](#) cada estado “Optimista” o “Pesimista” tiene asociado un determinado valor del parámetro aleatorio “*Demanda*”. Cada estado podría estar asociado a un conjunto de valores posibles sujetos a una distribución de probabilidades.

Estado	Probabilidad		Distribución Uniforme	
	Optimista	Pesimista	Mínimo	Máximo
Optimista	0.7	0.3	8	15
Pesimista	0.3	0.7	3	7

CUADRO (1.9). Probabilidades por estado y demandas uniformes.

El Cuadro [1.9](#) indica los valores de demanda que se puede observar en una jornada que fue calificada como uno de los estados descriptos. Para obtener el valor del parámetro demanda que formará parte del escenario se puede recurrir a una función por trozos (f) cuyo dominio sean los reales comprendidos entre 0 y 1, y su imagen los posibles valores mínimos y máximos de cada estado. Por ejemplo para el caso de una jornada clasificada como *Pesimista* y generando una muestra al azar de un valor del dominio. Si x es un número real comprendido entre 0 y 1, la demanda se puede determinar como:

$$f(x) = \begin{cases} 3 & \text{si } x \leq 0.2, \\ 4 & \text{si } 0.2 < x \leq 0.4, \\ 5 & \text{si } 0.4 < x \leq 0.6, \\ 6 & \text{si } 0.6 < x \leq 0.8, \\ 7 & \text{si } x > 0.8. \end{cases}$$

De igual forma se puede construir una función por trozos a partir de la realización de un estudio de estadística descriptiva sobre una muestra de valores de demanda producidas en el pasado.

5.3. Métodos de generación de escenarios.

Se puede encontrar en [43](#) una revisión de los diferentes métodos de generación de escenarios para modelos de optimización estocástica. Sea $\{\tilde{\xi}_t\}$ la realización de los parámetros aleatorios de un nodo correspondiente a t del árbol de escenarios, los distintos métodos difieren en el procedimiento que se utiliza para determinar esos valores.

Muestreo condicional:

Se trata de uno de los métodos más comunes de generación de escenarios. En cada nodo de un árbol de escenarios se toman muestras de la distribución de $\{\tilde{\xi}_t\}$ o del proceso representado por una fórmula explícita $\{\tilde{\xi}_{t+1}\} = z(\{\tilde{\xi}_\tau, \tau < t\}, \tilde{\epsilon})$, en la cual participan los valores de los parámetros aleatorios en los nodos anteriores al que se está evaluando en ese momento.

Muestreo con correlaciones:

Estos métodos producen los valores a partir de sus distribuciones marginales y de su matriz de correlación. En [46] se puede encontrar un algoritmo de generación de vectores de variables correlacionadas que no requiere la especificación de la distribución conjunta.

Ajuste de momentos:

Puede suceder que no se conozca la función de distribución del parámetro aleatorio pero sí sus momentos (media, desvío, asimetría, curtosis, etc.), adicionalmente otras medidas estadísticas (deciles, centiles, etc.) y, eventualmente, su matriz de correlación. Estos métodos construyen una distribución discreta que satisfaga estos valores característicos.

Se describen en [65] tres métodos comúnmente utilizados realizando una comparación del desempeño de cada uno de ellos. La idea básica es que tomando como entrada los momentos de la distribución requerida se calculan valores cuyos momentos coinciden con los momentos de entrada.

En [1] se describe un método de generación de valores ajustado a estimadores de un conjunto de muestras, junto con indicadores que permiten evaluar la calidad del ajuste.

Escenarios representativos:

El concepto de escenario representativo se ve en [28] agrupando un conjunto de escenarios y reduciendo el tamaño del árbol. Es utilizado cuando los escenarios se construyen sobre la base de datos históricos como ser series de tiempo buscando reagrupar los escenarios calculando uno que sea representativo del grupo.

Discretización óptima:

Determina los valores discretos de los parámetros aleatorios mediante un modelo de optimización que minimiza el error respecto de una función de referencia. Este concepto se ve desarrollado en varios trabajos, entre ellos [72].

6. Dinámica de poblaciones

Dado que la demanda del producto se ajusta a un proceso de difusión y dispersión se mencionan algunos conceptos de la dinámica de poblaciones que se utilizan para la generación de los valores de demanda que se incluirán en los escenarios a utilizar.

La expresión de crecimiento logístico formulada hacia mediados del siglo XIX por Verhulst formula un modelo de crecimiento acotado [8] por capacidad máxima que se expresa como

$$(44) \quad \frac{\partial x}{\partial t} = rx \left(1 - \frac{x}{T_x} \right),$$

en donde:

- x : individuos de una población,
- r : máxima tasa de crecimiento de la población,
- T_x : cantidad máxima de individuos de la población.

La ecuación (44) describe la variación de la cantidad de individuos de una población en función del avance del tiempo. Esta población tiene un valor de saturación, es decir una población máxima (T_x). A medida que la cantidad de individuos se aproxima a ese valor el crecimiento disminuye (ver Figura 1.4).

Posteriormente, cerca de la década de 1930 se formularon las ecuaciones de Lotka Volterra ([70]), también llamadas predador – presa, que se utilizan para modelar la evolución de dos poblaciones, una de las cuales es alimento (presa) para la otra (predador).

$$(45) \quad \begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= r_1 x \left(1 - \frac{x}{T_x} \right) - a_{12} xy, \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= -r_2 y \left(1 - \frac{y}{T_y} \right) + a_{21} xy. \end{aligned}$$

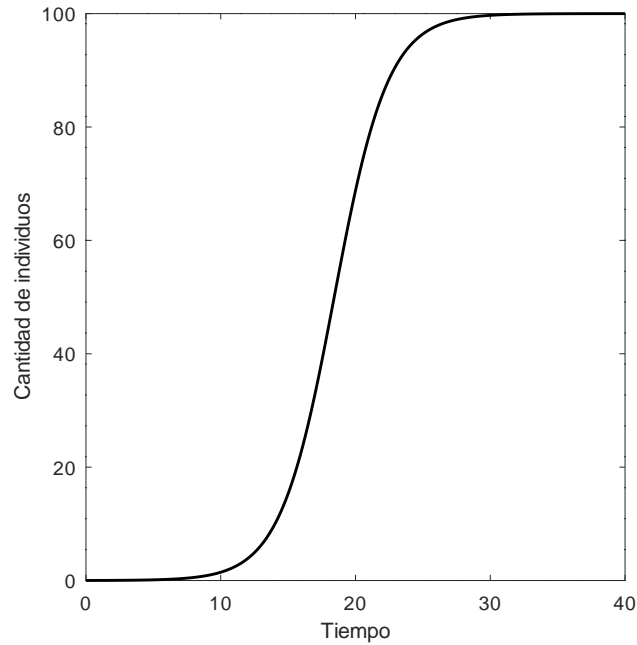


FIGURA (1.4). Crecimiento de una población con un valor máximo (Verhulst).

En estas ecuaciones, tenemos

- x : cantidad de individuos en la población de presas,
- y : cantidad de individuos en la población de predadores,
- r_1 : tasa de evolución máxima de presas en ausencia de predadores,
- r_2 : tasa de evolución máxima de predadores en ausencia de presas,
- T_x : población máxima de presas,
- T_y : población máxima de predadores,
- a_{12} : efecto sobre las presas de la interacción entre presas y predadores,
- a_{21} : efecto sobre los predadores de la interacción entre presas y predadores.

Las ecuaciones (45) describen la variación de la cantidad de individuos de dos poblaciones que interactúan entre sí a medida que avanza el tiempo. Ambas poblaciones tienen un valor de saturación, es decir una población máxima. Una población

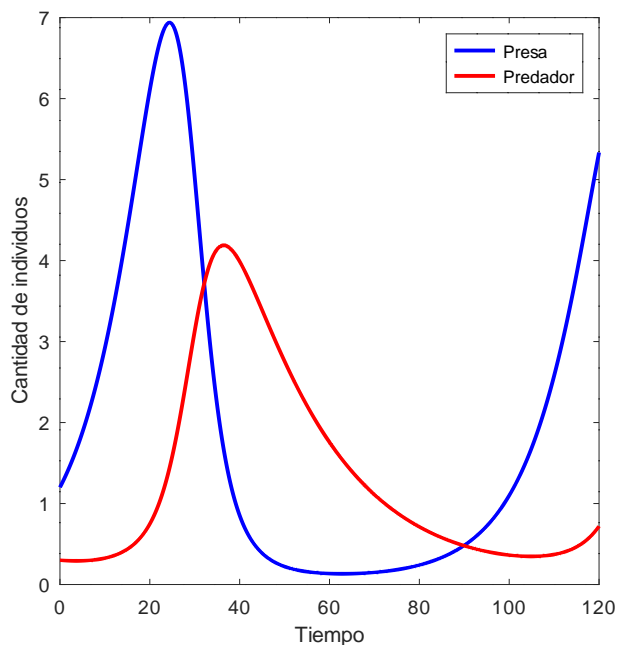


FIGURA (1.5). Evolución de los individuos de poblaciones que interactúan (Lotka-Volterra).

disminuye cuando se produce una interacción entre individuos de ambas poblaciones, en cuanto la otra se incrementa por ello. En la Figura [1.5](#) se puede observar que ambas poblaciones crecen hasta que la cantidad de predadores alcanza un determinado nivel, a partir de ahí las presas comienzan a decaer provocando que los predadores también disminuyan. Al alcanzar cierto mínimo las poblaciones vuelven a crecer.

Si hacemos

$$(46) \quad \begin{aligned} a_{11} &= \frac{r_1}{T_x}, \\ a_{22} &= \frac{r_2}{T_y} \end{aligned}$$

obtenemos

$$(47) \quad \begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= x(r_1 - a_{11}x - a_{12}y), \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= y(-r_2 + a_{21}x + a_{22}y). \end{aligned}$$

La expresión (47) utiliza variables definidas sobre los números reales, en particular, el tiempo es considerado como un continuo. A los efectos del tratamiento numérico de estas variables se consideran avances de tiempo discretos calculando los valores a intervalos Δt , desconociendo los valores de esas variables a intervalos de tiempo inferiores.

Discretizar las variables nos permite aplicar el procedimiento clásico de integración conocido como método de integración de Euler. Los valores de ambas variables se calculan para intervalos discretos de tiempo Δt conocidos como tamaño del paso de integración, quedando la expresión para el paso de integración q como:

$$\begin{aligned} x^{q+1} &= x^q + x^q (r_1 - a_{11}x^q - a_{12}y^q) \Delta t, \\ y^{q+1} &= y^q + y^q (-r_2 + a_{21}x^q + a_{22}y^q) \Delta t \end{aligned}$$

donde:

- x^q : cantidad de individuos de la población de presas en el paso q ,
- y^q : cantidad de individuos de la población de predadores en el paso q ,
- Δt : tiempo transcurrido entre tiempo asignado al paso de integración $q+1$ y el tiempo asignado al paso de integración q .

7. Contenido de la tesis

En el Capítulo 2 se describe detalladamente el procedimiento que se ha llevado adelante para la generación de los escenarios determinando el valor del parámetro demanda para cada una de las localidades y para cada uno de los períodos que conforma la campaña.

Se visualiza mediante gráficos el comportamiento de cada uno de los componentes en forma aislada y el comportamiento resultante de todos los componentes actuando en forma simultánea.

Posteriormente, en el Capítulo 3, llamado *Modelo de distribución / fabricación multiperíodo* se presenta un modelo de programación lineal entera estocástica que contempla la producción y posterior distribución de un único producto maximizando el beneficio esperado de una campaña. Se define como *Campaña* a un conjunto de períodos consecutivos que se ajusta a la evolución del ciclo agrícola.

Se consideran posibles escenarios para las localidades donde se comercializa el producto, las cuales serán abastecidas desde un conjunto de centros de distribución regionales de mayor capacidad.

El método de generación de escenarios utilizado en esta tesis se basa en el método de muestreo condicional en donde en cada etapa se estima el valor de la demanda en un período y en una localidad. Se aplica un proceso basado en cuatro elementos:

- Una discretización del clásico modelo de difusión de Lotka-Volterra ([70]), también llamado de predador – presa.
- Una función de disparo que hace reaccionar a la población de predadores cuando la población de presas supera un determinado umbral.
- La implementación del método de Montecarlo para determinar el surgimiento, o no, de un individuo de una población.
- Un modelo de dispersión a localidades cercanas.

Dada la difícil resolución del modelo planteado en el Capítulo 3 ya que incluye una importante cantidad de variables y para identificar mecanismos alternativos de solución, se presenta en el Capítulo 4 un modelo que concentra la demanda de las localidades en el centro de distribución más cercano. Un ejemplo numérico evidencia complicaciones al momento de encontrar una solución óptima ya que pasado un tiempo de ejecución prudencial establecido en 20 minutos CPLEX no encuentra solución óptima, aunque entrega resultados aceptables.

Para terminar, en el Capítulo 5 se describen tres heurísticas para alcanzar valores cercanos al óptimo del problema del Modelo de distribución / fabricación multiperíodo, que concentra la demanda de las localidades de consumo en aquel centro de distribución que se encuentra más cercano a ella, que fue descrito en el Capítulo 4. Éstas son:

- heurística de dos fases,
- heurística de ajuste compensado con avance temporal,
- heurística de ajuste por redondeo.

Las tres comienzan resolviendo la relajación lineal del modelo propuesto y buscan ajustar sus resultados para cumplir con las restricciones de integridad de las variables que lo requieran (cantidad de camiones enviados en cada período entre los diferentes centros y la cantidad de lotes de producción que se debe terminar en cada período que se realizan en los centros de fabricación).

La heurística *dos fases* ajusta los valores en dos etapas, en una primer instancia un ajuste compensado de los envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución ajustando los mismos hacia atrás en el tiempo y reelaborando los valores de la cantidad de lotes de fabricación realizados. Con posterioridad, se realiza una búsqueda guiada por los valores de la función objetivo para intentar encontrar mejoras en su valor realizando ajustes en las envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución guiados por el valor de las penalidades por demanda insatisfecha (incrementando el envío) y/o por excedente de stock (disminuyendo el envío) que participan en la evaluación de la función objetivo.

La segunda heurística instrumentada ajusta los valores resultantes de la solución de la relajación lineal realizando un ajuste compensado de los envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución ajustando los mismos hacia atrás en el tiempo y reelaborando los valores de la cantidad de lotes de fabricación realizados que se producen dentro de una ventana de tiempo que se establece como parámetro. Luego de fijar los valores para la ventana en curso se

resuelve nuevamente la relajación lineal del modelo y se avanza a la próxima ventana. El proceso continúa hasta que se completan todos los períodos del horizonte de planificación del modelo.

Por último se implementa una heurística que ajusta los valores de las variables con restricción de integralidad aplicando un ajuste por redondeo reiteradamente sobre las variables del envío de camiones desde los centros de fabricación a los centros de distribución y sobre la cantidad de lotes de fabricación realizados. El ajuste se realiza tomando un valor ϵ para determinar la magnitud del ajuste a realizar. Si la parte decimal del valor de la variable no entera es menor e igual a ϵ ajusta al entero inferior. En cambio, si la parte decimal es superior a $1 - \epsilon$ ajusta al entero superior. Luego de fijar los valores se realiza nuevamente la optimización del problema relajado y se vuelve a ajustar.

Se describen las heurísticas utilizando pseudo-código.

En el Capítulo [E](#) se realizan ejercicios numéricos con instancias de distintas características comparando sus resultados y rendimiento entre ellas, y contra la solución hallada en el Capítulo [4](#).

Las instancias utilizadas varían en diversas características del problema. Éstas son:

- cantidad de escenarios a considerar,
- diferentes cantidades de centros de distribución (6, 8, 10),
- segmentación geográfica de demanda a satisfacer,
- diferentes valores de los parámetros propios de cada heurística.

Los valores de la demanda se determina para los distintos escenarios con el procedimiento descrito en el Capítulo [2](#) y se puede apreciar la calidad de sus resultados obtenidos en una fracción pequeña del tiempo requerido por la solución mediante CPLEX.

Por último, en el Capítulo [7](#) se recopilan las conclusiones de este trabajo y mencionan algunos posibles trabajos futuros.

Generación de escenarios

En este capítulo se describe el mecanismo utilizado para la estimación de la demanda en cada período para cada una de las localidades que son centros de consumo basándonos en el método de muestreo condicional comentado en la Sección 5 del Capítulo 1. Dado que la demanda es aleatoria, para un mismo período y localidad se genera un conjunto de valores, y cada uno de ellos da origen a un escenario.

Suponemos que nuestro producto es utilizado para combatir un elemento que se propaga. En nuestro ejemplo suponemos una plaga que aparece en una localidad y se traslada a otra, la cual se combate con el producto cuya demanda queremos simular.

En la Sección 6 del Capítulo 1 se han presentado los modelos clásicos de dinámica poblacional llamados fórmula de Verhulst (8) y su ajuste a poblaciones con capacidad máxima llamado modelo de Lotka - Volterra (70) también citado como modelo de predador - presa.

El modelo de Lotka - Volterra es utilizado en esta tesis para simular la propagación de la plaga, sujeta a la acción de un plaguicida que la combate. La plaga se modela como la presa, en tanto que el plaguicida que la combate está representado por el predador el cual se complementa con otros aspectos que se presentan en el problema, entre ellos la migración de la plaga de una localidad a otra.

Para finalizar se presenta el modelo de generación de escenarios junto a un ejercicio numérico para observar su comportamiento.

1. Modelo de aparición y dispersión de la plaga

Al efecto de incluir en el modelo de dinámica poblacional otros aspectos del problema bajo estudio se incorporan los siguientes elementos adicionales:

- Umbral de visibilidad: una pequeña cantidad de individuos de la población de presas no es percibida por el predador.
- Surgimiento aleatorio: existe una probabilidad de presencias de individuos de la población de presas.
- Modelo de dispersión: las presas pueden migrar de una localidad a otra.

En las próximas subsecciones analiza individualmente cada uno de estos elementos.

1.1. Umbral de visibilidad.

La población de presas posee un umbral de visibilidad, es decir que cuando la cantidad de individuos es inferior a un determinado valor, su presencia no es percibida por los predadores. Cuando la cantidad de individuos de presas supera el umbral de visibilidad, atrae a una cantidad inicial de individuos de la población de predadores que comienza a interactuar con las presas.

Se define

- k_0 : umbral de visibilidad,
- y_0 : cantidad inicial de predadores cuando la población de presas supera k_0 .

Se establece una *función de disparo* para la cantidad de individuos de la población de predadores como:

$$(48) \quad d_y(x, y) = \begin{cases} y_0 & \text{si } x \geq k_0 \wedge y = 0 \\ y & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La población de predadores comienza en cero y así permanece hasta que se hacen visibles los individuos de la población de presas deja de ser inferior al umbral (k_0). En ese instante la cantidad de individuos de la población de predadores pasa a tomar un valor inicial (y_0), luego esta función pasa a entregar el valor de y .

Combinando esta función (48) con la función (47) se obtiene

$$(49) \quad \begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= x(r_1 - a_{11}x - a_{12}d_y(x, y)), \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= d_y(x, y)(-r_2 + a_{21}x + a_{22}d_y(x, y)). \end{aligned}$$

Ejemplo 8:

En la Figura 2.1 se puede observar cómo se comporta la evolución de la población de presas y predadores tomando los valores $r_1 = 0.113$, $r_2 = 0.05$, $a_{11} = 0.00113$, $a_{12} = 0.073$, $a_{21} = 0.03$, $a_{22} = 0$, $k_0 = 5$, $x_0 = 1$, y $y_0 = 1$. Se observa la evolución de las variables contemplando el umbral de visibilidad. Cuando la población de presas es inferior a una cantidad mínima de visibilidad percibida por el predador, este último no reacciona ante su presencia. En cuanto la cantidad de presas supera ese umbral, la población de predadores se hace presente con una cantidad inicial de individuos, y a partir de ahí, ambas poblaciones interactúan afectando la cantidad de individuos de ambas.

1.2. Surgimiento aleatorio.

De la observación de (47) se puede notar que ambas variables x e y deben ser distintas de cero para que exista interacción entre ambas a medida que avanza el tiempo. Si una de ellas es distinta de cero y la otra permanece en cero, el comportamiento es el reflejado en (44).

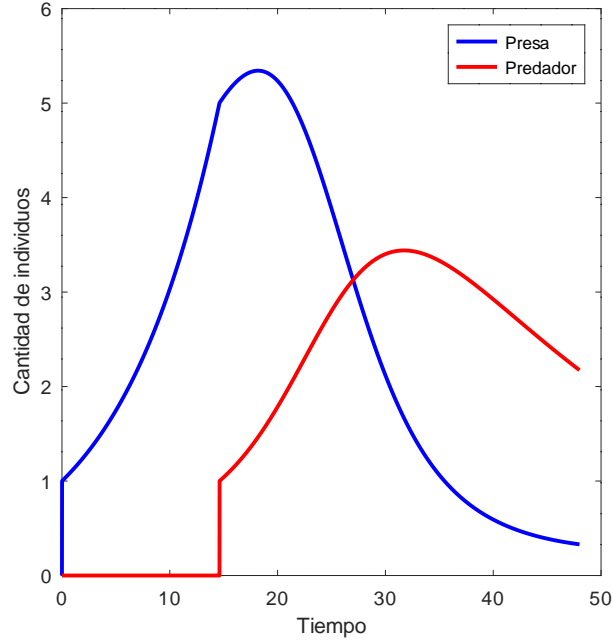


FIGURA (2.1). Evolución de la cantidad de individuos de ambas poblaciones contemplando un umbral de visibilidad.

La probabilidad de surgimiento de individuos en una población depende de múltiples factores vinculados al tipo de plaga, terreno, aspectos medioambientales, etc., incluso efectos producidos por los efectos del cambio climático [51] que explican esa posibilidad relativa de presencia de plaga.

Tratar de modelar esa cantidad diversa de factores representa un esfuerzo importante y fuera de foco en el desarrollo de esta tesis, razón por la cual el parámetro del modelo que representa la posibilidad de surgimiento de la plaga en un instante t se determina por una función $f(t)$ que indica la probabilidad de surgimiento de la plaga en el instante t .

Para representar el surgimiento de una cantidad de individuos de presas en un instante t , recurrimos al Método de Montecarlo obteniendo un número aleatorio (r) con una distribución uniforme entre 0 y 1, el cual comparamos con la probabilidad de surgimiento de presas en ese instante. Si el valor r es menor o igual a esa

probabilidad la población de la presas toma el valor correspondiente a la cantidad inicial de individuos preestablecido para esa población (x_0).

Se define

- $p_t = f(t)$ probabilidad de surgimiento de la presa en el instante t ,
- x_0 : población inicial de la presa,
- r : número aleatorio con distribución uniforme entre 0 y 1.

La función que contempla la probabilidad de surgimiento es

$$(50) \quad d_x(x, t) = \begin{cases} x & \text{si } x \neq 0, \\ 0 & \text{si } r > p_t \wedge x = 0, \\ x_0 & \text{si } r \leq p_t \wedge x = 0 \end{cases}$$

Ampliando la expresión (49) con (50) queda

$$(51) \quad \begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= d_x(x, t) (r_1 - a_{11}d_x(x, t) - a_{12}d_y(x, y)), \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= d_y(x, y) (-r_2 + a_{21}d_x(x, t) + a_{22}d_y(x, y)). \end{aligned}$$

En la Figura 2.2 se pueden observar distintas instancias de la evolución de las poblaciones. Inicialmente, en algún paso de integración, comienza a crecer la población de presas (x) y a partir que supera el umbral de visibilidad descrito en (1.1) comienza a evolucionar la población de los predadores (y). En la Figura 2.3 se exponen las probabilidades de surgimiento utilizadas en la ejemplificación del comportamiento de la población que fueron elegidas en forma arbitraria y son parámetros del modelo de generación.

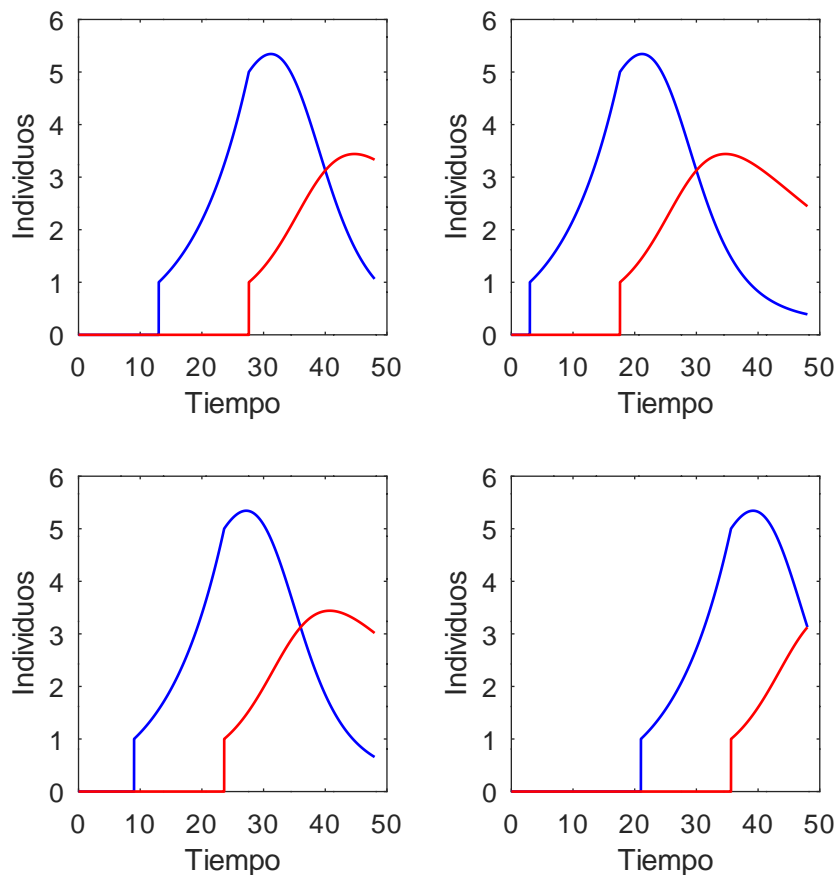


FIGURA (2.2). Evolución en el tiempo de los individuos de la población de plagas en diferentes realizaciones del proceso aleatorio de emergencia en un localidad.

1.3. Modelo de dispersión.

Ampliando el modelo para considerar a un grupo de poblaciones de presas con su idéntica cantidad de poblaciones de predadores se puede plantear la migración de individuos entre ellas.

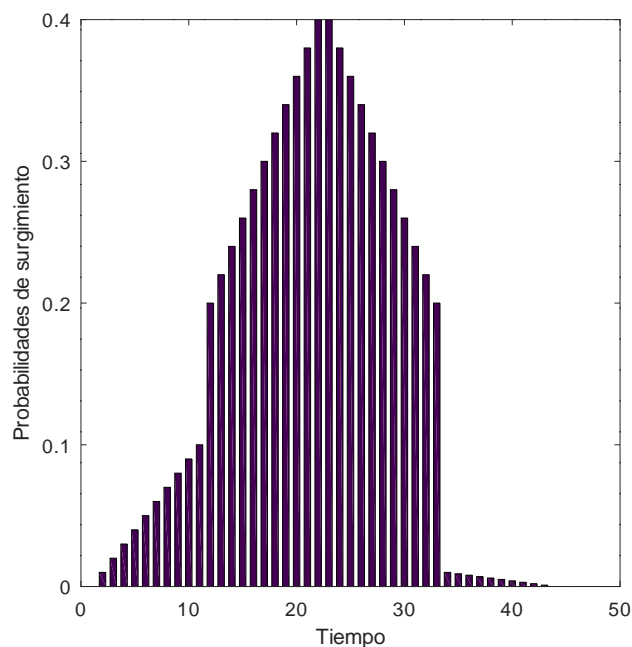


FIGURA (2.3). Probabilidades de surgimiento utilizadas en la ejemplificación de la evolución de la población de plagas.

De los distintos tipos de modelos de dispersión de especies mencionados a partir de la página [11], el utilizado para la dispersión del dengue en [54] se puede tipificar como un modelo de tasa de dispersión fija en el cual la especie es caracterizada por una constante que se amortigua en función de la distancia, a partir del cual se plantea la probabilidad de que un individuo de la población de presas que se ubica en la localidad indexada por i pueda migrar hacia la localidad indexada por j como:

$$(52) \quad q_{i,j} = \frac{k}{d_{i,j}^2},$$

donde:

- $d_{i,j}$ es la distancia que existe entre el punto central de la ciudad principal de la localidad indexada por i hasta el punto central de la ciudad principal de la localidad indexada por j ,
- k es una constante de dispersión asociada a la presa,
- $q_{i,j}$ es la probabilidad de que un individuo de la presa localizado en la localidad indexada por i migre a la localidad indexada por j .

Suponiendo que la cantidad de individuos que migran desde la población de presas radicadas en la localidad indexada por i hacia la localidad indexada por j es una variable aleatoria que se distribuye mediante un proceso binomial, el valor esperado de la cantidad de individuos migrantes en un paso de integración n se puede plantear como:

$$(53) \quad x_{i,j}^n = q_{i,j} x_i^n,$$

donde:

- $x_{i,j}^n$ es la cantidad esperada de individuos radicados en la localidad indexada por i que migran hacia la localidad indexada por j en el paso de integración n ,
- $q_{i,j}$ es la probabilidad de que un individuo de la presa localizado en la localidad indexada por i migre a la localidad indexada por j ,
- x_i^n es la cantidad de individuos de la población de presas en la localidad indexada por i al comienzo del paso de integración n .

Se puede ver en [54] que se modela la probabilidad de migración del mosquito *Aedes aegypti* entre pares de los cuadrados en los que se segmenta la Ciudad de Buenos Aires utilizando la expresión (52) para la realización de la simulación en donde la probabilidad de que un ejemplar se traslade de un espacio a otro es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos lugares haciendo que cuanto mas grande sea la distancia entre dos zonas la probabilidad de que un ejemplar de la especie migre disminuye considerablemente.

2. Procedimiento de generación de escenarios

La construcción de un modelo continuo que comprenda los tres aspectos mencionados anteriormente (aparición no determinista, evolución de la población y dispersión a otras zonas) se presenta como una tarea sumamente compleja, por lo cual abordaremos el problema mediante un modelo discreto que mantenga las características salientes modeladas en la versión continua.

Integrando los elementos descriptos en las Secciones [6](#) del Capítulo [1](#) y la Sección [1](#) de este capítulo, las expresiones que permiten obtener los valores de x e y para el siguiente paso de integración que resumen los efectos mencionados se pueden expresar como

$$(54) \quad \begin{aligned} x_i^{n+1} &= d_x(x_i^n, n) + [x_i^n (r_1 - a_{11}x_i^n - a_{12}y_i^n)] \Delta t \\ &+ \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^J q_{j,i}x_j^n - \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^J q_{i,j}x_i^n, \\ y_i^{n+1} &= d_y(x_i^n, y_i^n) + [y_i^n (-r_2 + a_{21}x_i^n + a_{22}y_i^n)] \Delta t, \end{aligned}$$

donde:

- x_i^{n+1} es la cantidad de individuos de la población de presas radicados en la localidad i en el período $n + 1$,
- x_i^n es la cantidad de individuos de la población de presas radicados en la localidad i en el período n ,
- y_i^{n+1} es la cantidad de individuos de la población de predadores radicados en la localidad i en el período $n + 1$,
- y_i^n es la cantidad de individuos de la población de predadores radicados en la localidad i en el período n ,
- r_1 es la tasa de evolución máxima de presas en ausencia de predadores,
- r_2 es la tasa de evolución máxima de predadores en ausencia de presas,
- a_{11} es la proporción que representa la tasa de evolución máxima de presas en ausencia de predadores respecto de la población máxima de presas,

- a_{12} es el efecto sobre las presas de la interacción entre presas y predadores,
- a_{21} es el efecto sobre los predadores de la interacción entre presas y predadores,
- a_{22} es la proporción que representa la tasa de evolución máxima de predadores en ausencia de presas respecto de la población máxima de predadores,
- $d_x(\dots)$ es la función de disparo en x desarrollada en la ecuación (50),
- $d_y(\dots)$ es la función de disparo en y desarrollada en la ecuación (48),
- $q_{i,j}$ es la probabilidad de que un individuo de la presa localizado en la localidad indexada por i migre a la localidad indexada por j .

Asociamos las presas (variable que tracciona) a la plaga (x) y los predadores (variable que es traccionada) al plaguicida (y) utilizado para combatirlo, el cual es la demanda del producto que debe ser producido y distribuido en nuestro modelo.

Dado que el parámetro demanda es no determinista, para diferentes realizaciones se materializan distintos valores de demanda y cada uno de ellos da origen a un escenario.

En la Figura 2.4 se pueden observar cuatro instancias de cantidades demandadas (representada por la altura de la barra) en cada período y por cada localidad con la acción conjunta de los tres efectos descriptos (dispersión, surgimiento aleatorio y contagio). Se observa que la cantidad demandada tiene un pico en el momento en el cual se detecta la plaga y a medida que avanza el tiempo este valor disminuye.

En las Figuras 2.5 a 2.8 se observa la distribución geográfica de las cantidades demandadas en los cuatro escenarios graficados en la Figura 2.4. En cada uno de ellos se ve la dispersión geográfica que se produce para la demanda del producto requerido para combatir la plaga.

La altura de las barras representa la cantidad demandada en la localidad en el período indicado en forma relativa a la cantidad total de demanda en el período.

Se puede observar cómo la demanda se presenta a partir de focos, de igual forma que se menciona en [33] para la dispersión geográfica observada de una plaga, que se comporta ampliando su zona y dispersándose a localidades cercanas.

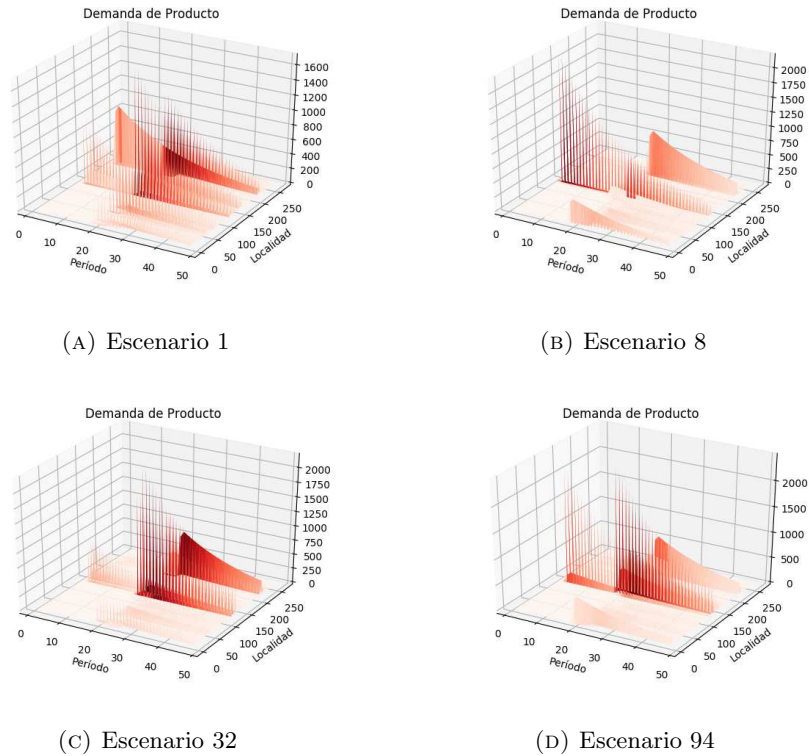


FIGURA (2.4). Escenarios con los tres efectos.

Esta dispersión también se ha podido observar en el trabajo [71] describiendo la dispersión de una plaga por la Región Patagónica Argentina

Así mismo, en el experimento controlado realizado en [29] una plaga termina ocupando todo el terreno que invade.

En la Figura 2.5 se ve la distribución geográfica de la demanda en cuatro períodos para el primer escenario. En el período 1, al comienzo del ciclo, se presenta demanda en las cercanías de las localidades de Córdoba Capital y Río Primero, ambas en la provincia de Córdoba y en la localidad de San Jerónimo en la provincia de Santa Fe. Para el período 10 la demanda se ha extendido a seis localidades de la provincia de Córdoba y a otras tres de la provincia de Santa Fe. Se ve que para el período 19 la demanda se ha extendido a seis provincias, Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, Santa Fe, Salta y Tucumán cubriendo 38 localidades sobre

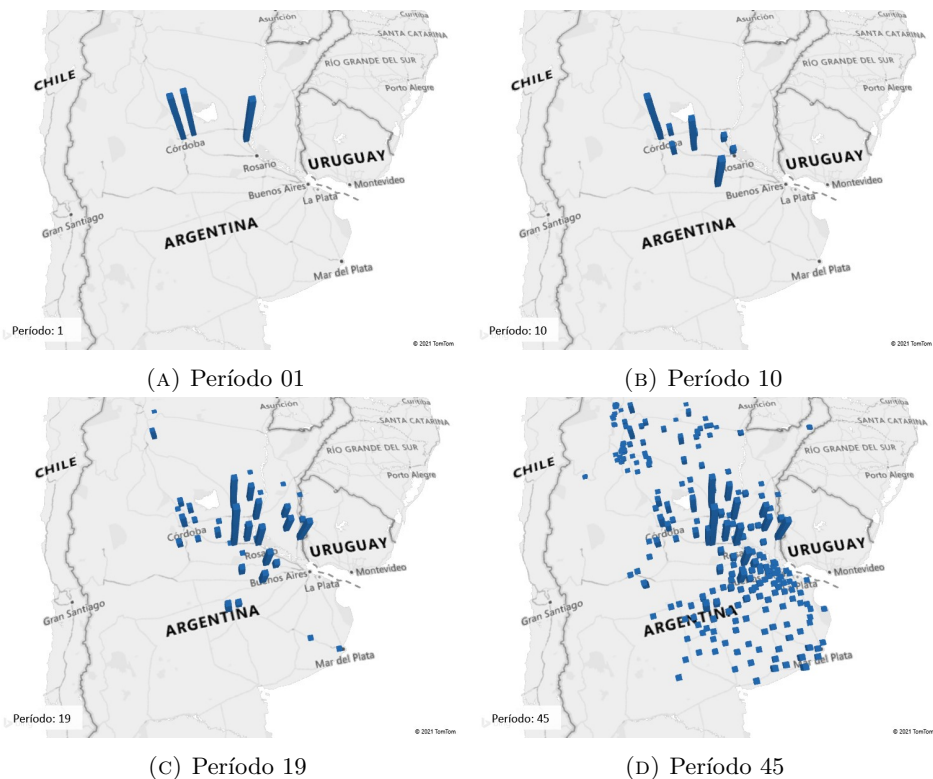


FIGURA (2.5). Demanda del escenario 1.

las seis mencionadas terminando el período 45 alcanzando 225 localidades en trece provincias lo que representa el 85 % de las localidades donde se produce el cultivo.

En la Figura [2.6](#) se observa la distribución geográfica de la demanda en los mismos cuatro períodos para el escenario número ocho. En el período 1 se presenta demanda en las cercanías de la localidad de Río Cuarto en la provincia de Córdoba y en las localidades de Belgrano y San Justo en la provincia de Santa Fe. Hacia el período 10 la demanda se ha extendido a diez localidades de las provincias de Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe. Para el período 19 la demanda se ha extendido a 36 localidades de seis provincias, Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, Santa Fe, Salta y Tucumán cubriendo 38 localidades sobre las seis mencionadas. Hacia el período 45 se extendió a 225 localidades en 13 provincias.

En las Figuras [2.7](#) y [2.8](#) se ve la evolución para los escenarios 32 y 94 observando el mismo desarrollo que en las figuras anteriores pero en diferentes localidades.

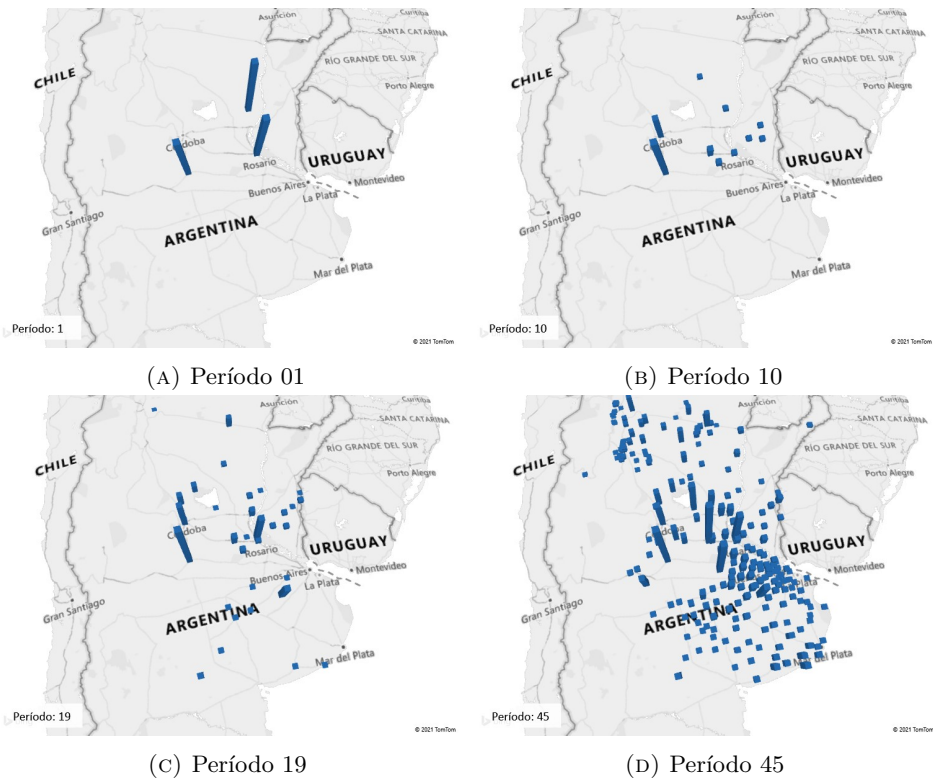


FIGURA (2.6). Demanda del escenario 8.

Realizando un estudio con todos los escenarios simulados calculando en cada uno de ellos la variable *Cantidad de localidades afectadas* y agrupando esa información por el período en el cual se manifiesta la demanda, se tiene un conjunto de 630 valores para cada período. En la Figura 2.9 se ve que los valores para cada período evolucionan con poca dispersión entre ellos llegando a acercarse al total de localidades hacia el período 40. La diferencia entre los valores máximos y mínimos se amplía en los períodos centrales en tanto que se mantienen estables en los períodos extremos.

En el Cuadro 2.1 se pueden ver valores estadísticos que permiten evaluar la dispersión para cada período que se mantiene estable hasta el período 17 y después del período 42.

Estos resultados parecen mostrar razonablemente bien un proceso por el cual una plaga se va dispersando por toda una región al mismo tiempo que su población

CUADRO (2.1). Cantidades de localidades con demanda en cada período.

Periodo	Media	Desvío Standard	Minimo	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 3	Maximo
1	2.95	1.441	1	2	3	4	8
2	9.29	2.606	3	7	9	11	17
3	9.29	2.606	3	7	9	11	17
4	9.29	2.606	3	7	9	11	17
5	9.29	2.606	3	7	9	11	17
6	9.29	2.606	3	7	9	11	17
7	9.29	2.606	3	7	9	11	17
8	9.29	2.606	3	7	9	11	17
9	9.29	2.606	3	7	9	11	17
10	9.29	2.606	3	7	9	11	17
11	9.29	2.606	3	7	9	11	17
12	9.29	2.606	3	7	9	11	17
13	9.29	2.606	3	7	9	11	17
14	9.29	2.606	3	7	9	11	17
15	9.29	2.606	3	7	9	11	17
16	9.29	2.606	3	7	9	11	17
17	9.29	2.606	3	7	9	11	17
18	27.30	3.970	15	25	27	30	40
19	36.98	4.373	23	34	37	40	50
20	57.69	5.037	44	54	58	61	72
21	82.52	5.367	64	79	83	86	100
22	105.30	5.283	88	102	106	109	122
23	124.19	4.993	105	121	124	128	139
24	138.68	4.592	122	136	139	142	151
25	150.07	4.415	134	147	150	153	163
26	158.89	4.324	145	156	159	162	170
27	165.80	3.907	155	163	166	168	177
28	172.14	3.817	161	169	172	175	183
29	178.18	3.639	168	176	178	181	188
30	184.12	3.656	174	182	184	187	195
31	189.56	3.634	178	187	189	192	200
32	194.30	3.556	182	192	194	197	204
33	199.04	3.568	186	197	199	202	208
34	203.30	3.512	189	201	203	206	214
35	206.74	3.338	195	204	207	209	216
36	210.23	3.291	200	208	210	213	219
37	212.75	3.225	203	211	213	215	221
38	214.99	3.089	206	213	215	217	223
39	217.74	3.195	209	216	218	220	226
40	219.64	3.074	209	218	220	222	228
41	221.00	2.953	212	219	221	223	229
42	221.85	2.849	213	220	222	224	229
43	223.05	2.781	214	221	223	225	231
44	223.05	2.781	214	221	223	225	231
45	223.05	2.781	214	221	223	225	231
46	223.05	2.781	214	221	223	225	231
47	223.05	2.781	214	221	223	225	231
48	223.05	2.781	214	221	223	225	231

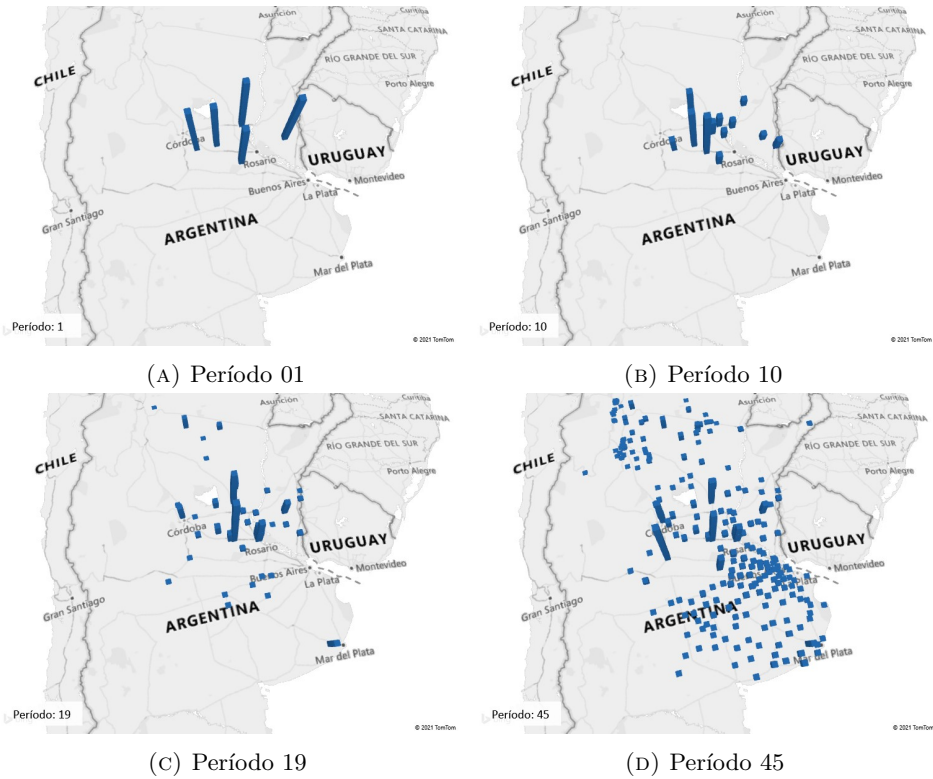


FIGURA (2.7). Demanda del escenario 32.

crece a medida que aumenta su disponibilidad de comida y simultáneamente, se combate su desarrollo en cuanto se visibiliza su existencia. Los parámetros del proceso de generación otorgan una flexibilidad que le permiten el ajuste a especies específicas de plagas y cultivos.

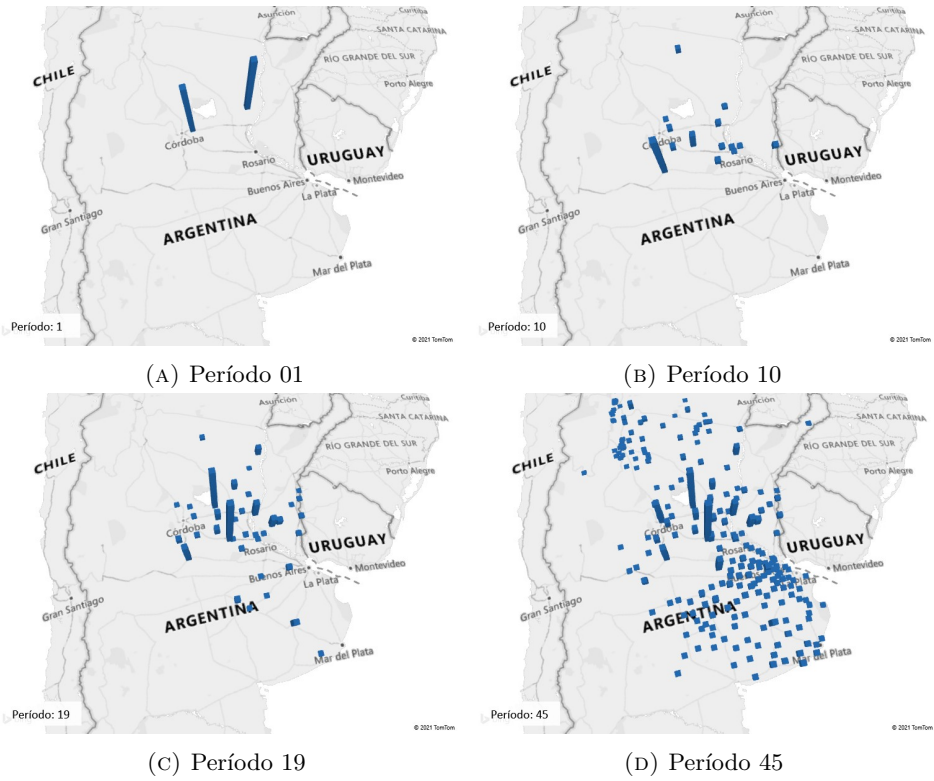


FIGURA (2.8). Demanda del escenario 94.

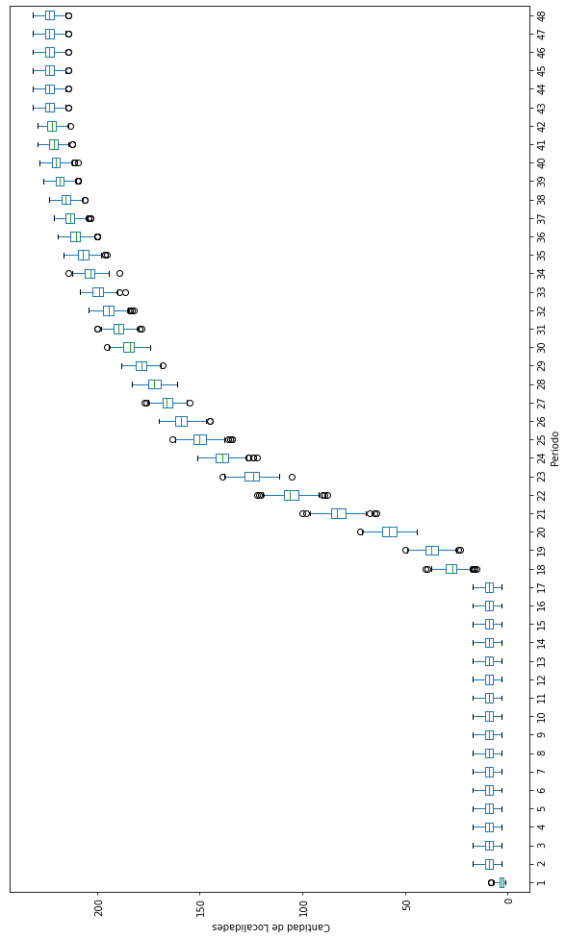


FIGURA (2.9). Cantidad de localidades afectadas en los distintos escenarios agrupados por período.

Modelo de distribución / fabricación multiperíodo

El propósito de este capítulo es presentar un modelo de programación lineal entera estocástica que contemple la fabricación y distribución del producto maximizando el beneficio esperado de una campaña (conjunto de períodos seguidos).

Se consideran posibles escenarios de demanda para las localidades en las cuales se comercializa el producto. Éstas serán abastecidas desde un conjunto de las mismas en las cuales se encuentran centros de distribución de mayor capacidad.

El producto se fabrica en un conjunto de centros de fabricación con capacidad de almacenamiento que se presupone es escaso y oneroso.

Formalmente, el área geográfica se representa mediante un grafo $G = (V, E)$, de modo tal que cada vértice representa:

- un centro de fabricación,
- un centro de distribución regional alternativo, o bien
- un punto de venta ubicado en una localidad de consumo.

Las aristas representan las distancias en pares de vértices, mediante una ruta adecuada.

Tenemos una función de distancia $w : E \rightarrow \mathbb{R}$ que asocia una distancia a cada arista del grafo, y un modelo no determinista de dispersión geográfica y temporal de la demanda requerida para el producto que se comercializa.

En la Figura [3.1](#) se esquematiza del movimiento de productos dentro de la cadena de distribución. Desde el centro de fabricación es enviado a los centros de distribución para luego ser enviado a los puntos de venta. Se permite el envío de los

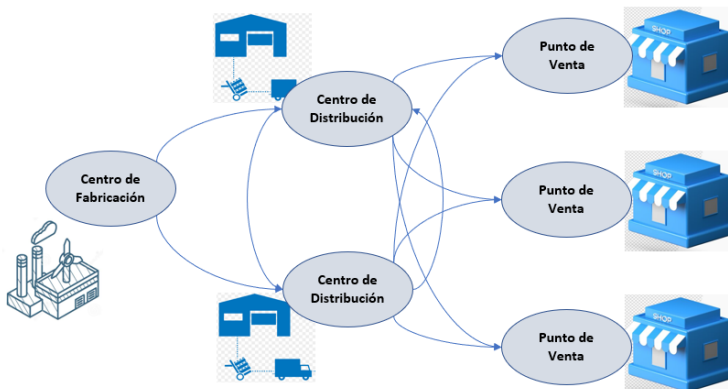


FIGURA (3.1). Esquema de la cadena de distribución del producto.

productos desde un centro de distribución a otro, aunque se penaliza fuertemente debido al impacto que tienen en la operatoria logística.

Con estos datos se debe determinar:

- el plan de producción, es decir, la cantidad de lotes que se tienen que tener disponibles para la distribución en cada centro de fabricación para cada período del horizonte de planificación,
- los centros de distribución que deben ser contratados para ese lapso,
- una estimación de los traslados que se deben realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución y desde ellos hacia los puntos de venta.

En las decisiones mencionadas se deben tener en cuenta los costos de fabricación y distribución, como así también las penalidades que se fijan para la demanda no satisfecha y para la permanencia del producto en los distintos stocks.

Dado que la demanda en cada punto de venta es no determinista, un conjunto de las demandas para cada uno de ellos representa un escenario a considerar con una probabilidad de ocurrencia asignada.

En adelante llamaremos a ese modelo en forma abreviada como *Modelo CC*.

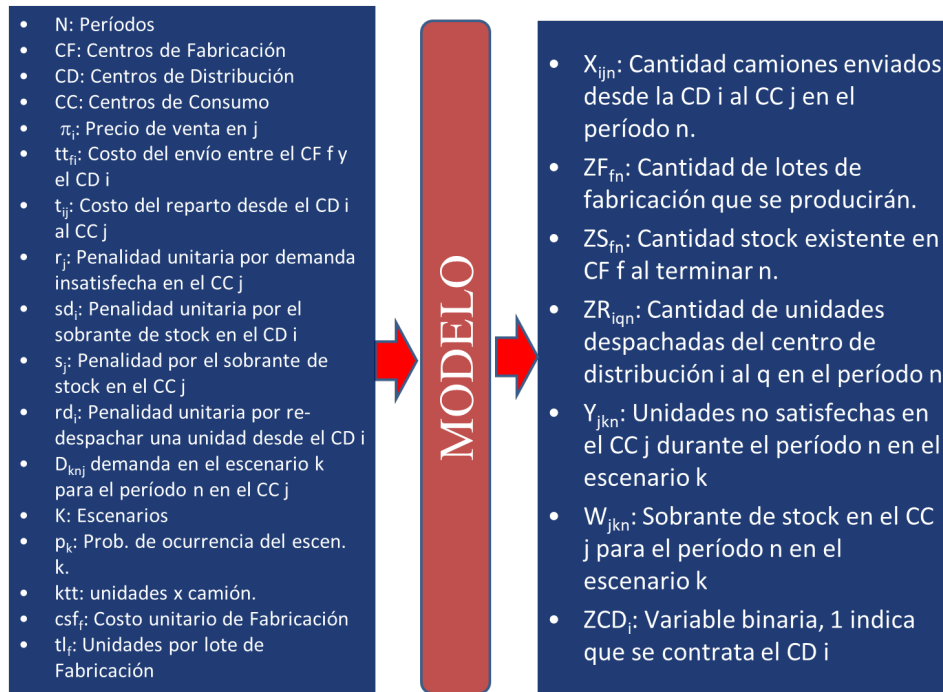


FIGURA (3.2). Esquema de parámetros y variables de decisión del modelo con la demanda centrada en los centros de consumo (modelo CC).

En la Figura [3.2](#) se presenta un esquema con los principales parámetros del modelo que se propone junto con las variables de decisión que se resuelven en él.

1. Conjuntos y Parámetros

Los siguientes parámetros caracterizan una instancia del problema:

$P = \{1, \dots, N\}$: Cada uno de los períodos en los cuales se descompone el horizonte de planeamiento. Usualmente, cada uno corresponde a una semana.

$CF = \{cf_1, cf_2, \dots, cf_f, \dots, cf_F\}$: Conjunto de los F centros de fabricación del producto. Para $f = 1, \dots, F$, el elemento cf_f denota la localidad donde se encuentra el centro de fabricación indexado por la posición f .

$CD = \{cd_1, cd_2, \dots, cd_i, \dots, cd_I\}$: Conjunto de los I centros de distribución regionales. Para $i = 1, \dots, I$, el elemento cd_i denota la localidad indexada por la posición i .

$CC = \{cc_1, cc_2, \dots, cc_j, \dots, cc_J\}$: Conjunto de J localidades que son puntos de venta o consumo. Para $j = 1, \dots, J$, el elemento cc_j indica la localidad en la cual se encuentra el punto de venta o centro consumo indexado por j .

$csf : CF \rightarrow \mathbb{R}$: costos de fabricar una unidad de producto en cada uno de los F centros de fabricación. Para $f = 1, \dots, F$, el parámetro $csf_f := csf(f)$ denota el costo de fabricar una unidad del producto en el centro de fabricación radicado en la localidad indexada por la posición f . En adelante se utiliza la notación csf_f .

$tl : CF \rightarrow \mathbb{R}$: Tamaños de lotes de fabricación del producto en cada uno de los F centros de fabricación. Para $f = 1, \dots, F$, el parámetro $tl_f := tl(f)$ indica la cantidad de unidades que se fabrican por lote de producción dentro del centro de fabricación que se encuentra indexado por la posición f . En adelante se utiliza la notación tl_f .

$cp : CF \rightarrow \mathbb{R}$: Capacidades máximas de producción (medidas en cantidad de lotes por período) de cada uno de los F centros de fabricación. Para $f = 1, \dots, F$, el parámetro $cp_f := cp(f)$ indica la cantidad máxima de lotes de producción que se pueden realizar por período dentro del centro de fabricación que se encuentra indexado por la posición f . En adelante se utiliza la notación cp_f .

$cpf : CF \rightarrow \mathbb{R}$: Capacidad máxima de almacenaje (en cantidad de unidades) de los almacenes existentes dentro de cada centro de fabricación. Para $f = 1, \dots, F$, el parámetro $cpf_f := cpf(f)$ denota la cantidad máxima de unidades que se pueden almacenar en el centro de fabricación indexado por f . En adelante se utiliza la notación cpf_f .

$if : CF \rightarrow \mathbb{R}$: Saldos existentes al inicio del horizonte de planeamiento, es decir al comienzo del primer período ($n = 1$) en cada uno de los centros de fabricación. Para $f = 1, \dots, F$, el parámetro $if_f := if(f)$ indica la cantidad existente en el centro de fabricación indexado por f al inicio del período 1. En adelante se utiliza la notación if_f .

$cap : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Capacidad máxima de almacenamiento (en cantidad de unidades) de cada centro de distribución. Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $cap_i := cap(i)$ indica la cantidad máxima de unidades que se pueden almacenar en el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i . En adelante se utiliza la notación cap_i .

$cfa : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Costos fijos vinculados a la contratación y puesta en funcionamiento del centro de distribución ubicado en cada localidad. Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $cfa_i := cfa(i)$ denota el monto necesario para poner en funcionamiento y mantener operando durante todo el horizonte de planeamiento al centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i . En adelante se utiliza la notación cfa_i .

$ia : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Saldo inicial pre-existente en cada uno de los I centros de distribución regionales. Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $ia_i := ia(i)$ indica la cantidad de unidades de producto que se encuentran en el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i . En adelante se utiliza la notación ia_i .

$tt : CF \times CD \rightarrow \mathbb{R}$: Costos de transporte por camión completo entre las ciudades principales de cada par de localidades. Para $f = 1, \dots, F$ e $i = 1, \dots, I$, el parámetro $tt_{fi} := tt(f, i)$ indica el costo de contratar un camión completo con ktt unidades de producto desde la localidad indexada por f hacia la localidad indexada por i . En cada camión se trasladan ktt unidades de producto. En adelante se utiliza la notación tt_{fi} .

$\pi : CC \rightarrow \mathbb{R}$: Precio de venta del producto vigente en cada uno de los puntos de venta. Para $j = 1, \dots, J$, el parámetro $\pi_j := \pi(j)$ indica el precio con el cual se venderá el producto en el punto de venta de la localidad indexada por j . En adelante se utiliza la notación π_j .

$capcc : CC \rightarrow \mathbb{R}$: Capacidad máxima de almacenamiento (en cantidad de unidades) de cada centro de consumo. Para $j = 1, \dots, J$, el parámetro $capcc_j := capcc(j)$ indica la cantidad máxima de unidades que se pueden almacenar en el centro de consumo ubicado en la localidad indexada por j . En adelante se utiliza la notación $capcc_j$.

K : indica la cantidad de escenarios a considerar. Cada uno de ellos determina los valores del parámetro sujeto a incertidumbre, es decir, de la demanda que se contempla para cada centro de consumo en cada uno de los períodos.

$d : CC \times \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, N\} \rightarrow \mathbb{R}$: Demanda para los K escenarios en las J localidades de los centros de consumo y para los N períodos. Para $j = 1, \dots, J$, $k = 1, \dots, K$, y $n = 1, \dots, N$, el valor $d_{jk}^n := d(j, k, n)$ indica el valor de la demanda en el centro de consumo indexado por j , para el período n , que fue determinado en la realización correspondiente al escenario k . En adelante se utiliza la notación d_{jk}^n .

$p : \{1, \dots, K\} \rightarrow \mathbb{R}$: Probabilidad de ocurrencia de cada uno de los escenarios. Para $k = 1, \dots, K$, el parámetro $p_k := p(k)$ indica la probabilidad de ocurrencia del escenario indicado por k . En adelante se utiliza la notación p_k . Suponemos que se cumple que

$$\sum_{k=1}^K p_k = 1.$$

$t : CD \times CC \rightarrow \mathbb{R}$: Costo unitario de transporte para el reparto (traslado al punto de consumo desde los centros de distribución regionales) del producto entre las ciudades principales de cada par de localidades. Para $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, el valor $t_{ij} := t(i, j)$ indica el costo de transportar una unidad desde el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i hacia el centro de consumo o punto de venta ubicado en la localidad indexada por j . En adelante se utiliza la notación t_{ij} .

$r : CC \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidad que se aplica por cada unidad demandada e insatisfecha en la localidad j . Para $j = 1, \dots, J$, el parámetro $r_j := r(j)$ indica la penalidad sufrida por cada unidad que se demanda en la localidad indexada por j que no puede ser entregada por inexistencia del producto en ese momento. El modelo no contempla desplazamiento de la demanda hacia el período siguiente, lo cual indica que esa oportunidad de venta es desperdiciada ya que se dirige a un producto de la competencia. Esta suposición es válida cuando en un mismo mercado existen varios productos con características similares haciendo que una de la forma de competir

de los fabricantes es ofreciendo una mejor calidad de servicio. En adelante se utiliza la notación r_j .

$rd : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidad que se aplica por cada unidad re-despachada desde el centro de distribución ubicado en cada localidad. Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $rd_i := rd(i)$ indica la penalidad sufrida por enviar una unidad de producto desde el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i hacia otro centro de distribución. En adelante se utiliza la notación rd_i .

$s : CC \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidad que se aplica por cada unidad que permanece en el stock del centro de consumo de la localidad j al finalizar un período. Para $j = 1, \dots, J$, el parámetro $s_j := s(j)$ indica la penalidad sufrida por cada unidad de producto que se encuentra en el centro de consumo ubicado en la localidad indexada por j al finalizar el período y que no fue comercializada. En adelante se utiliza la notación s_j .

$sf : CF \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidad que se aplica por cada unidad que permanece en stock al finalizar un período en el centro de fabricación f . Para $f = 1, \dots, F$, el parámetro $sf_f := sf(f)$ indica la penalidad aplicable a cada unidad de producto que mantenga en el stock del centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f al finalizar el período. En adelante se utiliza la notación sf_f .

$sd : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidad que se aplica por cada unidad que permanece en stock al finalizar un período en el centro de distribución i . Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $sd_i := sd(i)$ refiere a la penalidad aplicable a cada unidad de producto que se encuentre en el stock del centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i , al finalizar un período. En adelante se utiliza la notación sd_i .

2. Variables de decisión

El modelo de optimización incluye las siguientes variables:

$X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1J}^1, x_{21}^1, \dots, x_{ij}^n, \dots, x_{IJ}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas, que corresponden a la cantidad que se debe entregar al inicio de cada período en cada localidad proveniente de cada centro de distribución. Para

$i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, y $n = 1, \dots, N$, la variable x_{ij}^n indicará la cantidad de unidades que se deben enviar desde el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i hacia el centro de consumo de la localidad indexada por j al comienzo del período n .

$Y = \{y_{11}^1, y_{21}^1, \dots, y_{J1}^1, y_{11}^2, \dots, y_{J1}^2, \dots, y_{jk}^n, \dots, y_{JK}^n\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas, correspondientes a las demandas insatisfechas de cada punto de venta para cada escenario en cada período. Para $j = 1, \dots, J$, $n = 1, \dots, N$, y $k = 1, \dots, K$, la variable y_{jk}^n indicará la cantidad demandada, en unidades, que no se ha podido satisfacer, dada la inexistencia de stock en el centro de consumo de la localidad indexada por j , en el período n cuando se presenta el escenario k .

$W = \{w_{11}^1, w_{21}^1, \dots, w_{J1}^1, w_{11}^2, \dots, w_{J1}^2, \dots, w_{jk}^n, \dots, w_{JK}^n\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas con los excedentes de stock en cada punto de venta para cada escenario en cada período. Para $j = 1, \dots, J$, $n = 1, \dots, N$, y $k = 1, \dots, K$, la variable w_{jk}^n indicará la cantidad sobrante, en unidades, en el centro de consumo de la localidad indexada por j , en el período n cuando se presenta el escenario k .

$ZF = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión enteras no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados en cada centro de fabricación y en cada período. En cada lote producido en la fábrica f se producen tl_f unidades de producto, con $tl_f \in TL$. Para $f = 1, \dots, F$, y $n = 1, \dots, N$, la variable zf_f^n indicará la cantidad de lotes que se deben terminar en la fábrica f durante el período n .

$ZS = \{zs_1^1, \dots, zs_1^N, zs_2^1, \dots, zs_f^n, \dots, zs_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de producto existente en cada centro de fabricación al final de cada período. Para $f = 1, \dots, F$, y $n = 1, \dots, N$, la variable zs_f^n indicará la cantidad de unidades de producto que se mantendrán al finalizar el período n en el almacén existente en la fábrica que se encuentra en la localidad indexada por f .

$ZT = \{zt_1^1, \dots, zt_1^N, zt_2^1, \dots, zt_i^n, \dots, zt_I^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de producto existente al final de cada período en cada centro de distribución. Para $i = 1, \dots, I$, y $n = 1, \dots, N$, la variable zt_i^n

indicará la cantidad de producto existente al finalizar el período n en el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i .

$ZC = \{zc_{12}^1, \dots, zc_{12}^N, zc_{13}^1, \dots, zc_{fi}^n, \dots, zc_{FI}^N\}$: Conjunto de variables de decisión enteras no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se despachan de cada fábrica con destino a cada centro de distribución en cada período. Cada camión traslada ktt unidades de producto. Para $f = 1, \dots, F$, $i = 1, \dots, I$, y $n = 1, \dots, N$, la variable zc_{fi}^n indicará la cantidad de camiones completos que se despacharán desde la fábrica ubicada en la localidad indexada por f hacia el centro de distribución ubicado en localidad indexada por i durante el período n .

$ZR = \{zr_{12}^1, \dots, zr_{12}^N, zr_{21}^1, \dots, zr_{iq}^n, \dots, zr_{I(I-1)}^N\}$ Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de productos re-despachados entre centros de distribución en cada período. Para $i = 1, \dots, I$, $q = 1, \dots, I$, $n = 1, \dots, N$, y, además, i es distinto de q , la variable zr_{iq}^n indica la cantidad de unidades que se deben enviar desde el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i hacia el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por q durante el período n .

$ZCD = \{zcd_1, \dots, zcd_i, \dots, zcd_I\}$: Conjunto de variables de decisión binarias que indican la contratación (1) o no (0) del centro de distribución de cada localidad durante todos los períodos. Para $i = 1, \dots, I$, la variable zcd_i indicará, en caso de contener el valor 1 que se contratará y pondrá en funcionamiento el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i .

3. Función objetivo

Se busca maximizar el resultado esperado de la explotación, cuyos rubros se componen de:

- ingresos esperados por venta en cada una de las localidades ($Vtas$),
- costos de fabricación (Fab),
- costos de transporte desde los centros de fabricación a los centros de distribución (CT_1),

- costos de transporte desde los centros de distribución a las localidades que son puntos de venta o de consumo (CT_2),
- costos de puesta en marcha y funcionamiento de los centros de distribución (CCD_1),
- costos de mantener los stocks en los centros de distribución (CCD_2),
- penalidad por re-despacho entre los centros de distribución (CP_1),
- penalidad esperada por la demanda insatisfecha que se produce en los centros de consumo (CP_2), y
- penalidad esperada por el sobre stock que se produce en los centros de consumo (CP_3).

La función objetivo del modelo busca maximizar el **resultado esperado** de la explotación comercial, haciendo la diferencia entre los ingresos esperados y los componentes diversos de costos que debe afrontar, algunos de ellos son esperados también. Queda expresada como

$$(55) \quad \text{máx } z = Vtas - Fab - CT_1 - CT_2 - CCD_1 - CCD_2 - CP_1 - CP_2 - CP_3.$$

Los componentes de la ecuación (55) que dependen de los K escenarios son:

- ingresos esperados por venta en cada una de las localidades ($Vtas$),
- penalidad esperada por la demanda insatisfecha que se produce en los centros de consumo (CP_2), y
- penalidad esperada por el sobre stock que se produce en los centros de consumo (CP_3).

El resto de los costos no está sujeto a aleatoriedad dado que son costos incurridos por las decisiones tomadas para todo el intervalo de planificación. Por el ejemplo, el costo de fabricación (Fab) esta vinculado a los lotes de fabricación que se deben realizar en cada centro de fabricación y este valor se establece para todos los escenarios.

3.1. Ventas esperadas.

Ingreso esperado por venta del producto en cada una de las localidades. Para cada uno de los centros de consumo, la cantidad vendida se determina mediante, por un lado, la suma de la cantidad recibida en el período y el stock remanente del período anterior, menos el stock remanente al final del período. Para el período inicial no se considera stock anterior. Dado que los stocks dependen de los diferentes escenarios, se toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos. Para cada centro de consumo de la localidad indexada por j perteneciente a los centros de consumo (CC), para cada uno de los escenarios $k = 1, \dots, K$, se determina la venta total de la localidad indexada por j para el escenario k , la cual se multiplica por su precio de venta (π_j) y por la probabilidad de ocurrencia del escenario (p_k).

Los componentes de la función objetivo no están contemplando el efecto financiero por lo cual, no se está calculando el valor presente neto (NPV) aunque no existe inconveniente en incorporar el costo del dinero mediante una tasa de descuento la cuál debería ser idéntica para ingreso y para egresos.

$$Vtas = \sum_{j \in CC} \sum_{k=1}^K \left[p_k \pi_j \left[\sum_{n=2}^N \left[\left(\sum_{i \in CD} x_{ij}^n \right) + w_{jk}^{n-1} - w_{jk}^n \right] + \left(\sum_{i \in CD} x_{ij}^1 \right) - w_{jk}^1 \right] \right]$$

3.2. Costos de fabricación.

Se establece multiplicando el costo unitario de fabricación por el tamaño del lote, y por la cantidad de lotes que se fabrican. Para cada centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f del conjunto de centros de fabricación (CF), y $n = 1, \dots, N$ se multiplica el costo unitario de fabricación (csf_f) por la cantidad de unidades por lote tl_f , por la cantidad de lotes que se fabrican (zf_f^n) en el período n .

$$Fab = \sum_{f \in CF} \sum_{n=1}^N csf_f tl_f zf_f^n.$$

3.3. Costos de transporte desde los centros de fabricación a los centros de distribución.

Por cada centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f del conjunto de centros de fabricación (CF), por cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i del conjunto de centros de distribución (CD), con $n = 1, \dots, N$, se multiplica el costo de transportar un camión completo desde la localidad indexada por f hacia la localidad indexada por i por la cantidad de camiones que se despachan entre dichas localidades durante el período n .

$$CT_1 = \sum_{f \in CF} \sum_{i \in CD} \sum_{n=1}^N tt_{fi} zc_{fi}^n$$

3.4. Costos de transporte desde los centros de distribución a las localidades en las cuales se encuentra el punto de venta o de consumo.

Para cada localidad indexada por i perteneciente a las localidades donde se encuentran ubicados los centros de distribución (CD), para cada localidad indexada por j perteneciente a las localidades donde se encuentran los centros de consumo (CC), para $n = 1, \dots, N$, se multiplica el costo de transporte en cual se incurre al trasladar una unidad desde la localidad indexada por i hacia la localidad indexada por j por la cantidad de unidades que se transportan entre esas localidades en el período n .

$$CT_2 = \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CC} \sum_{n=1}^N tt_{ij} x_{ij}^n$$

3.5. Costo de puesta en marcha y funcionamiento de los centros de distribución.

Para cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i perteneciente al conjunto CD de centros de distribución, suma el costo de puesta en marcha del centro de distribución cfa_i por la variable binaria que indica si el centro de distribución es contratado ($zcd_i = 1$) o no ($zcd_i = 0$)

$$CCD_1 = \sum_{i \in CD} cfa_i zcd_i$$

3.6. Costo de mantener el stock en el centro de distribución.

Para cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i perteneciente al conjunto CD de centros de distribución, suma el producto de la penalidad por exceso de stock sd_i por la suma de todas las unidades que permanecen en el stock en el centro de distribución al final de cada período, la cual se obtiene sumando para $n = 1, \dots, N$ la variable zt del stock al final de cada período indexado por i para el período n .

El nivel de stock en los centros de distribución no depende de los escenarios dado que la variabilidad en la demanda es amortiguada por los stocks en los puntos de venta.

$$CCD_2 = \sum_{i \in CD} sd_i \left(\sum_{n=1}^N zt_i^n \right)$$

3.7. Penalidad por re-despachos entre los centros de distribución.

Para cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i perteneciente al conjunto de centros de distribución (CD) se multiplica su penalidad (rd_i) por la suma de las unidades enviadas a cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por q , también perteneciente al conjunto de centros de distribución (CD) pero distinto de i , en todo período $n = 1, \dots, N$

$$CP_1 = \sum_{i \in CD} rd_i \left[\sum_{\substack{q \in CD \\ i \neq q}} \left(\sum_{n=1}^N zr_{iq}^n \right) \right].$$

3.8. Penalidad esperada por la demanda insatisfecha que se produce en los centros de consumo.

La demanda insatisfecha en los centros de consumo depende del escenario considerado, por lo cual se toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada uno

de ellos. Para cada centro de consumo ubicado en la localidad indexada por j perteneciente al conjunto de los centros de consumo (CC), $k = 1, \dots, K$, $n = 1, \dots, N$ se multiplica la penalidad del centro de consumo j por la demanda insatisfecha en el centro de consumo j para el período n en la realización del escenario k por la probabilidad de ocurrencia del escenario k .

$$CP_2 = \sum_{j \in CC} r_j \left(\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K y_{jk}^n p_k \right).$$

3.9. Penalidad esperada por el exceso de stock que se produce en los centros de consumo.

El exceso de stock en los centros de consumo depende del escenario considerado, por lo cual se toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada escenario. Para cada centro de consumo ubicado en la localidad indexada por j perteneciente al conjunto de los centros de consumo (CC), $k = 1, \dots, K$, $n = 1, \dots, N$ se multiplica la penalidad del centro de consumo j por el exceso de stock en el centro de consumo j para el período n en la realización del escenario k por la probabilidad de ocurrencia del escenario k .

$$CP_3 = \sum_{j \in CC} s_j \left(\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K w_{jk}^n p_k \right).$$

4. Restricciones

4.1. Centros de fabricación.

Los centros de fabricación tienen una capacidad de almacenamiento, generalmente más limitada y de mayor costo que la de un centro de distribución.

4.1.1. Stock al finalizar cada período con excepción del primero ($n > 1$).

Para todos los períodos con excepción del primero, el stock al finalizar el período n se forma a partir del stock en el período anterior $n - 1$ que se incrementan con

las unidades producidas en el período y se descuentan las unidades enviadas a los centros de distribución.

$$zs_f^{n-1} + tl_f z f_f^n - \left(ktt \sum_{i \in CD} z c_{fi}^n \right) = zs_f^n \quad \forall (n, f) \in \{2, \dots, N\} \times CF.$$

4.1.2. *Stock al finalizar el primer período ($n = 1$).*

Para el primer período, el stock al finalizar se forma a partir del stock inicial al cual se incrementan las unidades producidas en el primer período y se descuentan las unidades despachadas a los centros de distribución.

$$if_f + tl_f z f_f^1 - \left(ktt \sum_{i \in CD} z c_{fi}^1 \right) = zs_f^1 \quad \forall f \in CF.$$

4.1.3. *Capacidad de almacenamiento en los centros de fabricación.*

Al final de cada período el stock no debe superar la capacidad de almacenamiento.

$$zs_f^n \leq cpf_f \quad \forall (f, n) \in CF \times \{1, \dots, N\}.$$

4.1.4. *Capacidad máxima de producción en los centros de fabricación.*

En cada período, la cantidad de lotes de producción terminados no puede superar la capacidad máxima de producción del centro de fabricación.

$$z f_f^n \leq cp_f \quad \forall (f, n) \in CF \times \{1, \dots, N\}.$$

4.2. Envío de los camiones desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución.

4.2.1. *Camiones enviados en cada período con excepción del primero ($n > 1$).*

La cantidad de producto que se envía desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución es, a lo sumo, la cantidad de producto existente al final del período anterior.

$$(56) \quad ktt \sum_{i \in CD} zc_{fi}^n \leq zs_f^{n-1} \quad \forall (n, f) \in \{2, \dots, N\} \times CF.$$

4.2.2. Camiones enviados en el primer período ($n = 1$).

La cantidad de producto que se envía desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución en el primer período es, a lo sumo, la cantidad inicial existente en el centro de fabricación.

$$(57) \quad ktt \sum_{i \in CD} zc_{fi}^1 \leq if_f \quad \forall f \in F.$$

4.3. Stock en los centros de distribución.

4.3.1. Evolución del stock ($n > 1$).

Para todos los períodos, con excepción del primero, el stock al final del período anterior se incrementa con las unidades recibidas desde los centros de fabricación ajustado por los re-despachos recibidos y/o enviados por los otros centros de distribución y disminuido por los envíos hacia los centros de consumo.

$$zt_i^{n-1} + ktt \sum_{f \in CF} zc_{fi}^n + \sum_{\substack{q \in CD \\ q \neq i}} zr_{qi}^n - \sum_{j \in CC} x_{ij}^n - \sum_{\substack{q \in CD \\ q \neq i}} zr_{iq}^n = zt_i^n \\ \forall (i, n) \in CD \times \{2, \dots, N\}.$$

4.3.2. Evolución del stock ($n = 1$).

Similar a la evolución en los demás períodos pero, en lugar de tener en cuenta el stock al final de período anterior se toma el stock inicial en el centro de distribución.

$$ia_i + ktt \sum_{f \in CF} zc_{fi}^1 + \sum_{\substack{q \in CD \\ q \neq i}} zr_{qi}^1 - \sum_{j \in CC} x_{ij}^1 - \sum_{\substack{q \in CD \\ q \neq i}} zr_{iq}^1 = zt_i^1 \quad \forall i \in CD.$$

4.3.3. Capacidad de almacenamiento ($n > 1$).

La capacidad de almacenamiento del centro de distribución no debe ser superada, por lo tanto, el stock en el período anterior más las unidades recibidas en ese período más las unidades redespachadas recibidas no debe superar su capacidad de almacenamiento.

$$zt_i^{n-1} + ktt \sum_{f \in CF} zc_{fi}^n + \sum_{\substack{q \in CD \\ q \neq i}} zr_{qi}^n \leq cap_i zcd_i \quad \forall (i, n) \in CD \times \{2, \dots, N\}.$$

4.3.4. Capacidad de almacenamiento ($n = 1$).

De idéntica manera, el nivel del stock en el primer período no debe superar la capacidad de almacenamiento del centro de distribución.

$$ia_i + ktt \sum_{f \in CF} zc_{fi}^1 + \sum_{\substack{q \in CD \\ q \neq i}} zr_{qi}^1 \leq cap_i zcd_i \quad \forall i \in CD.$$

4.4. Stock en los puntos de venta.

El nivel de stock en los puntos de venta no debe superar su capacidad de almacenamiento.

$$w_{ij}^n \leq capcc_j \quad \forall (j, k, n) \in CC \times \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, N\}.$$

4.5. Satisfacción de la demanda.

4.5.1. *Ajuste de la demanda insatisfecha o del sobrante de stock para cada período con excepción del primero ($n > 1$).*

En cada centro de consumo, la demanda debe ser cubierta con el sobrante de stock del período anterior más el producto recibido en el período, compensado por la demanda insatisfecha del período. Dado que la demanda es diferente para las distintas realizaciones de los escenarios, los valores de la variable stock y demanda insatisfecha, también lo son.

$$w_{jk}^{n-1} - w_{jk}^n + y_{jk}^n + \sum_{i \in CD} x_{ij}^n = d_{ij}^n \quad \forall (j, n, k) \in CC \times \{2, \dots, N\} \times \{1, \dots, K\}.$$

4.5.2. *Ajuste de la demanda insatisfecha o del sobrante de stock para el primer período ($n = 1$).*

La demanda del primer período debe ser cubierta con el producto recibido en el período, compensado por la demanda insatisfecha del período o por el stock al final del período.

$$y_{jk}^1 - w_{jk}^1 + \sum_{i \in CD} x_{ij}^1 = d_{ij}^1 \quad \forall (j, k) \in CC \times \{1, \dots, K\}.$$

5. Evaluación preliminar de performance

El modelo planteado tiene variables enteras, algunas de ellas toman valores potencialmente distintos para cada uno de los escenarios, incrementando la cantidad de restricciones junto con la cantidad de variables lo cual afecta la performance del proceso de solución. Para observar el impacto en la performance, se realizan en esta sección experimentos preliminares resolviendo la relajación lineal (no el modelo completo).

Se han tomado como centros de consumo las 266 localidades en las cuales se ha producido soja en la campaña 2013/14 (ver Apéndice [J](#)) colocando un centro de fabricación en la localidad de Rosario. Se ofrecen ocho centros de distribución regionales (ver ubicación geográfica en la Figura [3.3](#)):

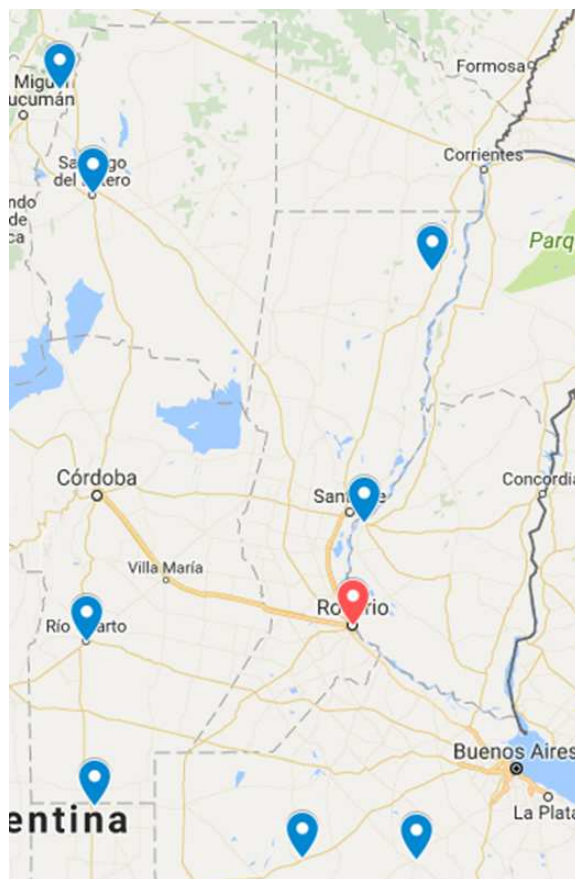


FIGURA (3.3). Ubicación del centro de fabricación y de los centros de distribución.

Provincia	Localidad	Latitud	Longitud
Buenos Aires	Carlos Casares	-35,623027	-61,360367
Buenos Aires	Saladillo	-35,636574	-59,778618
Córdoba	Río Cuarto	-33,132019	-64,349670
Entre Ríos	Paraná	-31,741320	-60,511547
La Pampa	Realicó	-35,038017	-64,246574
Santa Fe	General Obligado	-28,729529	-59,564237
Sgo. del Estero	Banda	-27,784420	-64,267281
Tucumán	Burruyacú	-26,499424	-64,741943

Para el cálculo de las distancias entre localidades se han tomado las coordenadas geográficas de latitud y longitud del punto central provisto por el servicio de google

maps (<http://maps.google.com>) de la ciudad principal de la localidad. En el Apéndice [K](#) se pueden observar las coordenadas geográficas tomadas para cada una de las localidades.

Para la estimación de los costos de transporte, se han tomado las distancias (δ) entre las localidades (considerando zonas centrales de las ciudades principales de cada una de ellas), multiplicadas por el costo del gas-oil (cg) y por una constante (θ) asociada al consumo por unidad de distancia (kilómetro) del transporte utilizado.

El mecanismo de estimación de demanda se describe en el Capítulo [2](#) tomándolos como datos a los efectos de esta sección.

La capacidad de almacenamiento en la fábrica es levemente inferior a la de cada uno de los centros de distribución. El almacenamiento en la fábrica es muy costoso. Los costos fijos de los centros de distribución son iguales y la probabilidad de ocurrencia de cada escenario es la misma (los escenarios son equiprobables). Las penalidades por demanda insatisfecha duplican a las de exceso de stock.

Los precios de venta en los centros de consumo son variados y sensiblemente superiores a los costos de fabricación. En tanto que los centros de consumo no tienen capacidad de almacenamiento.

Los experimentos se realizaron en un equipo con procesador Intel *I7* de 2.4 GHz con 16 Gb de memoria RAM y sistema operativo de 64 bits utilizando IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.5.1.0.

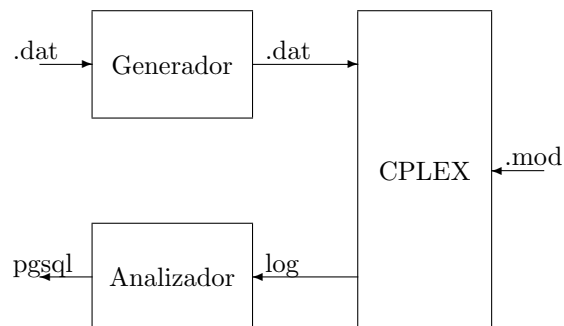
Las variables que se han definido como enteras son:

- cantidad de lotes de fabricación a terminar en cada período ($zf_f^n \in \mathbb{Z}$ para $n = 1, \dots, N$ y para $f = 1, \dots, F$),
- cantidad de camiones enviados desde la fábrica a los centros de distribución ($zc_{fi}^n \in \mathbb{Z}$ para $n = 1, \dots, N$, $i = 1, \dots, I$ y para $f = 1, \dots, F$), y
- se debe (1) o no (0) contratar el centro de distribución ($zcd_i \in [0, 1]$ para $i = 1, \dots, I$).

Inicialmente se ha experimentado resolviendo el modelo entero con una instancia de solamente un escenario, la cantidad total de variables de decisión es 131900 de las cuales 440 son enteras resultando que luego de 8 hs. de ejecución no alcanzó solución óptima con un gap de 0.08 % (en el Apéndice [D](#) se muestra parte del log de la ejecución del solver) por lo cual se continua experimentando con la relajación lineal, incorporando una mayor cantidad de escenarios por ejemplo 100, que elevaría la cantidad de variables a más de 268000 y así poder observar el comportamiento de los tiempos de ejecución y los resultados que se obtienen.

En la Figura [3.4](#) se ve la arquitectura de la implementación conformada por un módulo que ajusta los datos preparándolos para el experimento a realizar, CPLEX que realiza la optimización y el analizador que explora el log generado por CPLEX realizando la persistencia de los resultados en la base de datos PostgreSQL versión 12. Tanto el generador como el analizador se encuentran implementados en Python 3.4.

FIGURA (3.4). Arquitectura de la implementación.



El Apéndice [C](#) contiene las sentencias OPL del modelo y el Apéndice [E](#) muestra las sentencias OPL que escriben en el log generado por CPLEX.

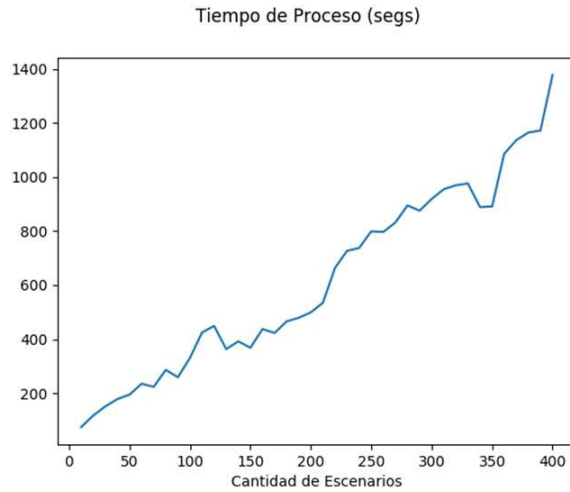


FIGURA (3.5). Tiempos de proceso de cada instancia para la solución de la relajación lineal en función de la cantidad de escenarios que contiene.

Se realizaron corridas optimizando la relajación lineal del modelo e incrementando la cantidad de escenarios que se consideran en cada instancia, comenzando en 10 a incrementos de 10 hasta llegar a considerar 400 escenarios.

Se observa (Figura 3.5) el crecimiento del tiempo de ejecución en base a la cantidad de escenarios que se toman en cuenta en la corrida, aproximadamente 3.3 segundos por cada escenario.

En la Figura 3.6 se muestra que a medida que incrementamos la cantidad de escenarios sugiere fabricar mayor cantidad de unidades, comenzando con más de 100000 para 10 escenarios bajando a poco menos de 33000 para los 400 escenarios. Simultáneamente, la cantidad a producir se dispersa en mayor cantidad de períodos (Ver Cuadro 3.1).

En el Anexo E se encuentran los valores de cada uno de los rubros que afectan la función objetivo (Ventas, costos de fabricación, costos de transporte, penalidades, etc.) en donde se puede ver la diferencia entre el resultado de la explotación sin contemplar las penalidades y el valor de la función objetivo luego de afectarlas, lo que visualmente se puede observar en la Figura 3.7

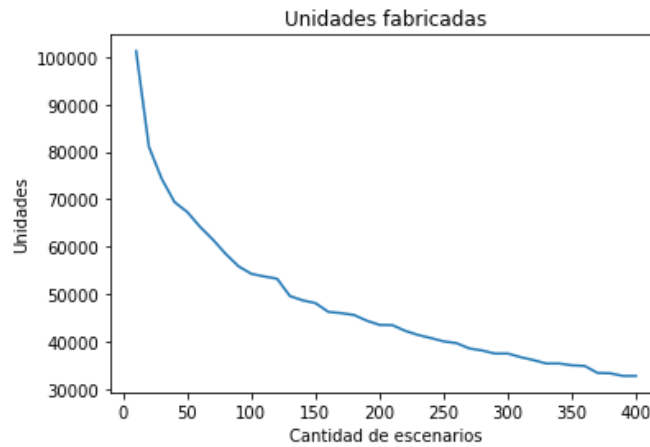


FIGURA (3.6). Cantidad de unidades a fabricar de cada instancia sugeridos por la relajación lineal en función de la cantidad de escenarios.

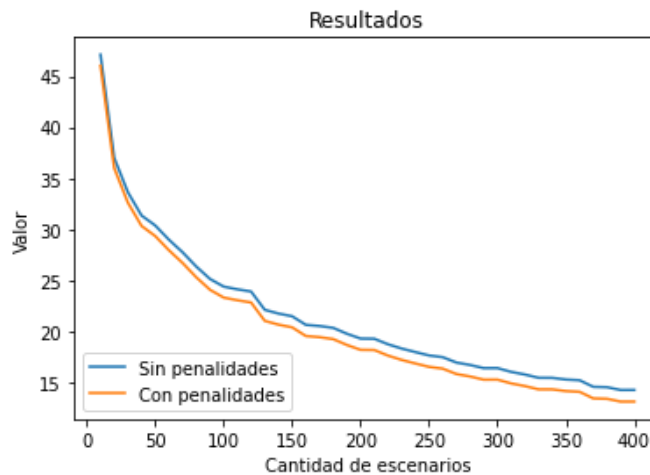


FIGURA (3.7). Valor del resultado de la explotación con / sin tener en cuenta las penalidades obtenidos por la relajación lineal en función de la cantidad de escenarios.

La cantidad y ubicación de los centros de distribución que se contratan varía en función de la cantidad de escenarios considerada. En la Figura 3.2 se pueden observar los centros contratados para algunas instancias que difieren en la cantidad de escenarios. Para 10 escenarios los centros de distribución contratados son los de Carlos Casares, Saladillo, Paraná, Realicó, Banda, y Burreyacú. Cuando se pasa a considerar 20 escenarios se deja de contratar Burreyacú.

CUADRO (3.2). Centros de distribución contratados según las diferentes instancias.

#	Provincia	Partido	Escenarios			
			10	20	30 – 120	130–
1	Buenos Aires	Carlos Casares	×	×	×	×
2	Buenos Aires	Saladillo	×	×	×	×
3	Córdoba	Río Cuarto			×	
4	Entre Ríos	Paraná	×	×	×	×
5	La Pampa	Realicó	×	×		
6	Santa Fé	General Obligado				
7	Sgo. del Estero	Saladillo	×	×	×	×
8	Tucumán	Burruyacu	×			

De los 30, 40, ..., 120 escenarios se mantiene estable los centros de distribución contratados, cambiando Realicó por Río Cuarto, quedando Carlos Casares, Saladillo, Río Cuarto, Paraná y Banda.

Desde los 130, 140, ..., 400 desaparece Río Cuarto del conjunto de centros de distribución contratados descripto en el párrafo anterior.

En cuanto a la cobertura de las localidades desde los centros de distribución (ver Figura 3.8), es decir, ¿cuáles son las localidades que son abastecidas por cada uno de los centros de distribución?

Se puede observar que cuando se procesan 10 escenarios, Burruyacú (Tucumán) abastece las localidades de Tucumán hacia el noroeste, Banda (Santiago del Estero) llega mayoritariamente a Santiago del Estero, Chaco y Formosa, Realicó (La Pampa) al oeste de La Pampa, San Luis y sur de Córdoba; Paraná (Entre Ríos) cubre la Mesopotamia, Santa Fe y Córdoba; Carlos Casares (Bs.As.) abastece el oeste de Buenos Aires y el este de La Pampa en tanto que Saladillo llega al resto de la provincia de Buenos Aires.

Cuando se observa la cobertura contemplando 300 escenarios Banda (Santiago del Estero) pasa a cubrir todo el NOA mas Chaco y Formosa; Paraná (Entre Ríos) la zona anterior se le agregan el norte de San Luis y de Córdoba; Carlos Casares (Bs. As.) llega hasta algunas localidades de San Luis; en tanto que Saladillo (Bs. As.) sigue abasteciendo prácticamente a las mismas localidades.

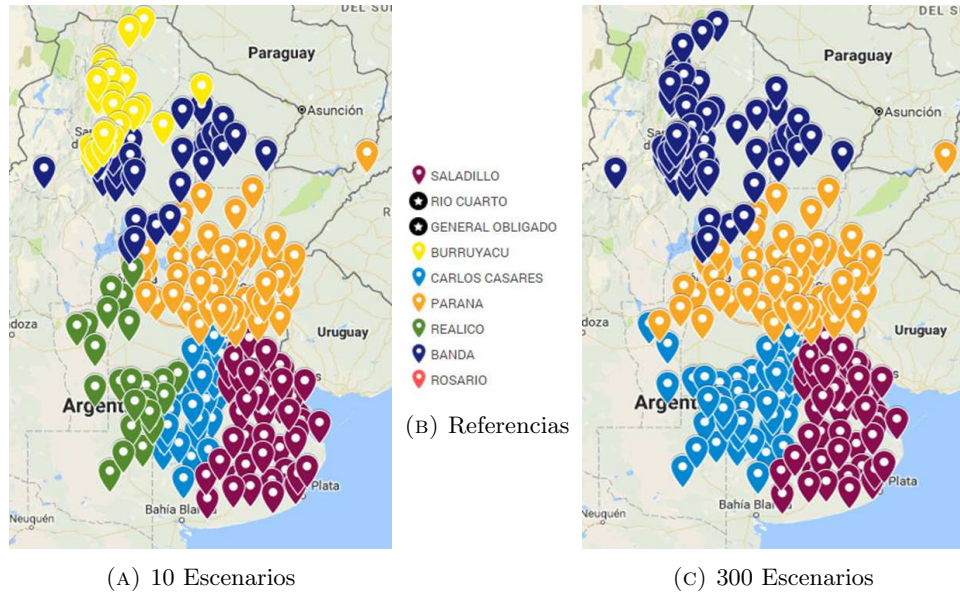


FIGURA (3.8). Localidades abastecidas por los centros de distribución en las instancias de 10 escenarios y de 300 escenarios.

5.1. Conclusión. Los tiempos de ejecución han crecido en forma importante a pesar de que las restricciones de integralidad se han relajado acercándose a los 3' para el tratamiento de 400 escenarios.

La cantidad de variables del modelo (cv) se puede expresar como:

$$(58) \quad cv = F + N(2F + I(J + F + I)) + K(2JN)$$

En nuestro ejemplo numérico con 400 escenarios supera los 10 millones de variables.

Dada la cantidad de variables del problema y con el objeto de encontrar soluciones adecuadas que satisfagan las condiciones de variable entera para aquellas que en su naturaleza así corresponde tratar, se realiza en el Capítulo 4 una reducción del modelo concentrando en los centros de distribución la demanda de su zona de influencia desafectando del alcance de la optimización el despacho de las unidades

desde los centros de distribución hasta los puntos de venta de las localidades de consumo.

Se busca con esta disminución del alcance del modelo de optimización un caso de estudio más simple que permita la elaboración de procedimientos que logren una reducción del tiempo de procesamiento y una mejor aproximación al valor óptimo.

Modelo con demanda en los centros de distribución

Dado el tamaño del problema del Modelo de distribución / fabricación multiperíodo presentado en el Capítulo 3 se elabora en este capítulo un modelo que concentra la demanda de las localidades en aquel centro de distribución que se encuentra más cercano a ella. Esta simplificación permite reducir el tamaño del modelo al no contemplar el tramo final de la distribución desde el centro de distribución regional al punto de venta, aunque, como se verá, permitirá encontrar una solución óptima en un tiempo de cómputo razonable.

Los ajustes realizados a partir del modelo del Capítulo 3 son los siguientes:

- se han quitado las variables pertinentes a la selección de los centros de distribución regionales,
- fue eliminada la restricción de la capacidad de almacenamiento de los centros de consumo,
- fue eliminado el efecto que produce en los resultados el costo de transporte de salida de los centros de distribución hacia los centros de consumo,
- los demás parámetros, costos unitarios de fabricación, costos unitarios de transporte, precios de ventas, etc. se mantienen en ambos modelos.

En este capítulo, en primera instancia, se describe el procedimiento utilizado para asignar la demanda de cada una de las localidades de consumo hacia el centro de distribución más cercano, a continuación se reformulan los parámetros del modelo y se describe el ajuste sobre las restricciones y la función objetivo.

En adelante llamaremos en forma abreviada a este modelo como *Modelo CD* para diferenciarlo del modelo descrito en el Capítulo 3.

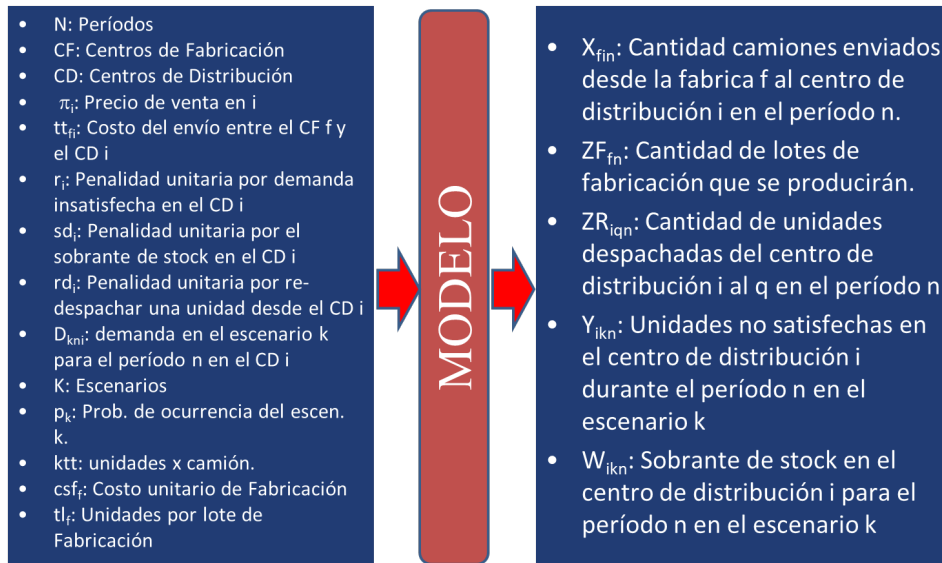


FIGURA (4.1). Esquema de parámetros y variables de decisión del modelo con la demanda centrada en los centros de distribución (modelo CD).

En la Figura 4.1 se presenta un esquema con los principales parámetros del modelo que se propone junto con las variables de decisión que se resuelven en él.

Al terminar se presentan los resultados de un ejercicio numérico comparado con los resultados obtenidos por el modelo anterior, de tal forma de evidenciar la divergencia que se obtiene respecto al modelo planteado en el Capítulo 3.

1. Asignación de la demanda al centro de distribución

Se describe el procedimiento por el cual se transfiere el valor del parámetro demanda de cada una de las localidades que son centro de consumo a la demanda de la localidad donde se encuentra el centro de distribución más cercano.

Consideremos las siguientes definiciones.

$d : CC \times \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, N\} \rightarrow \mathbb{R}$: Demanda para los K escenarios en las J localidades de los centros de consumo y para los N períodos. Para $j = 1, \dots, J$, $k = 1, \dots, K$, y $n = 1, \dots, N$, el valor $d_{jk}^n := d(j, k, n)$ indica el valor de la demanda

en el centro de consumo indexado por j , para el período n , que fue determinado en la realización correspondiente al escenario k . En adelante se utiliza la notación d_{jk}^n .

$\delta : CD \times CC \rightarrow \mathbb{R}$: Distancias entre cada uno de los I centros de distribución a cada uno de los J centros de consumo. Para $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, el valor $\delta_{ij} := \delta(i, j)$ indica la distancia entre el punto central de la localidad en donde se encuentra el centro de distribución indexado por i hasta el punto central de la localidad correspondiente al centro de consumo indexado por j . En adelante se utiliza la notación δ_{ij} .

$dd : CD \times \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, N\} \rightarrow \mathbb{R}$: Demandas para los K escenarios en las I localidades de los centros de distribución y para los N períodos. Para $i = 1, \dots, I$, $n = 1, \dots, N$, y $k = 1, \dots, K$, el valor $dd_{ik}^n := dd(i, k, n)$ indica el valor de la demanda en el centro de distribución indexado por i que resume la que se presenta en las localidades cercanas, para el período n , que fue determinado en la realización del escenario k . Este parámetro se calcula según el Algoritmo [4.1](#) en base a los dos parámetros anteriores. En adelante se utiliza la notación dd_{ik}^n .

Algoritmo 4.1 *Asignación de la demanda al centro de distribución*

```

1: for  $k = 1, \dots, K$  do
2:   for  $n = 1, \dots, N$  do
3:      $dd_{ik}^n := 0$  para  $i = 1, \dots, I$ 
4:     for  $j \in CC$  do
5:        $i^* := \operatorname{argmin}_{i \in CD} \{\delta_{ij}\}$ 
6:        $dd_{i^*k}^n := dd_{i^*k}^n + d_{jk}^n$ 
7:     end for
8:   end for
9: end for

```

Al terminar la ejecución los valores del parámetro de las demandas concentradas en los centros de distribución $\{dd_{ik}^n\}_{i \in CD, k \in \{1, \dots, K\}, n \in \{1, \dots, N\}}$ acumulan las demandas de los centros de consumo de las localidades que se encuentran más cercana a cada uno de ellos. Es decir, en dd_{ik}^n se suman todas las demandas de los centros de consumo d_{jk}^n para los cuales la localidad indexada por j se encuentra

más cercana a la localidad indexada por i que cualquier otra localidad donde se encuentre un centro de distribución.

2. Parámetros

Los parámetros que caracterizan el modelo ajustado son similares a los parámetros del modelo descrito en el Capítulo 3. A continuación se describen las diferencias que se pueden encontrar en ellos.

$\pi : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Precio de venta del producto comercializado desde cada centro de distribución. Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $\pi_i := \pi(i)$ indica el precio con el cual se venderá el producto en el punto de venta despachándolo desde el centro de distribución de la localidad indexada por i . En este modelo los precios son establecidos en cada centro de distribución en lugar de especificarlos para cada centro de consumo como en el modelo descrito en el Capítulo 3.

$DD : CD \times \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, K\} \rightarrow \mathbb{R}$: Demanda de la zona de influencia de cada centro de distribución para los K escenarios en las I localidades de los centros de distribución y para los N períodos. Para $i = 1, \dots, I$, $n = 1, \dots, N$, y $k = 1, \dots, K$, el parámetro $dd_{ik}^n := dd(i, k, n)$ indica el valor de la suma de las demandas en las localidades cercanas al centro de distribución indexado por i , para el período n , que fue determinado en la realización correspondiente al escenario k . Este parámetro es calculado en base al algoritmo detallado en la Sección 1 de este Capítulo.

$R : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidades que se aplican por cada unidad demandada e insatisfecha en el centro de distribución ubicado en la localidad i . Para $i = 1, \dots, I$, el parámetro $r_i := r(i)$ indica la penalidad sufrida por cada unidad que se demanda en el centro de distribución indexado por i que no puede ser entregada por inexistencia del producto en ese momento. Al igual que en el modelo CC la oportunidad de venta no satisfecha es desperdiciada. Presenta una diferencia respecto al modelo del Capítulo 3 aplicando la penalidad sobre la demanda insatisfecha a nivel del centro del centro de distribución en lugar de sobre el centro de consumo.

3. Variables de decisión

El modelo de optimización trata de encontrar los valores óptimos para las variables que se describen en esta sección.

$X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1I}^1, x_{21}^1, \dots, x_{fi}^n, \dots, x_{FI}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que corresponden a la cantidad de camiones ¹ que se deben despachar al inicio de cada período a la localidad donde se encuentra cada centro de distribución proveniente de cada centro de fabricación. Para $f = 1, \dots, F$, $i = 1, \dots, I$, y $n = 1, \dots, N$, la variable x_{fi}^n indicará la cantidad de camiones que se deben enviar desde el centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f hacia el centro de distribución de la localidad indexada por i al comienzo del período n . Recordemos que, a diferencia del modelo del Capítulo ³, no se busca conocer la distribución final a los centros de consumo. Igualmente sucede con las variables Y y W .

$Y = \{y_{11}^1, y_{21}^1, \dots, y_{I1}^1, y_{11}^2, \dots, y_{I1}^N, \dots, y_{ik}^n, \dots, y_{IK}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas correspondientes a las demandas insatisfechas de cada uno de los centros de distribución para cada escenario en cada período. Para $i = 1, \dots, I$, $n = 1, \dots, N$, y $k = 1, \dots, K$, la variable y_{ik}^n indicará la cantidad demandada, en unidades, que no se ha podido satisfacer, dada la inexistencia de stock en el centro de distribución de la localidad indexada por i , en el período n cuando se presenta el escenario k .

$W = \{w_{11}^1, w_{21}^1, \dots, w_{i1}^1, w_{11}^2, \dots, w_{I1}^N, \dots, w_{ik}^n, \dots, w_{IK}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas con los excedentes de stock en cada centro de distribución para cada escenario en cada período. Para $i = 1, \dots, I$, $n = 1, \dots, N$, y $k = 1, \dots, K$, la variable w_{ik}^n indicará la cantidad sobrante, en unidades, en el centro de distribución de la localidad indexada por i , en el período n cuando se presenta el escenario k .

¹Nótese que en este caso la variable X representa la cantidad de camiones desde los centros de fabricación a los centros de distribución y en el caso del modelo del Capítulo ³ contiene las unidades que se envían del centro de distribución al centro de consumo. Se trata de dos escalas diferentes de transporte, uno troncal y otro de distribución zonal o de última milla.

$ZF = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados como se ha en el modelo CC del Capítulo 3.

$ZS = \{zs_1^1, \dots, zs_1^N, zs_2^1, \dots, zs_f^n, \dots, zs_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de productos existentes en cada centro de fabricación como se ha definido en el modelo en CC del Capítulo 3.

$ZR = \{zr_{12}^1, \dots, zr_{12}^N, zr_{21}^1, \dots, zr_{iq}^n, \dots, zr_{I(I-1)}^N\} = \{zr_{iq}^n\}_{n \in \{1, \dots, N\}, i, q \in CD^2, i \neq q}$
 Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de productos re-despachados de un centro de distribución a otro como se ha definido en el modelo en CC del Capítulo 3.

4. Función objetivo

Se busca maximizar el resultado de la explotación cuyos rubros se componen de

- ingresos esperados por venta en cada una de las localidades ($Vtas$),
- costos de fabricación (Fab),
- costos de transporte desde los centros de fabricación a los centros de distribución (CT),
- penalidad por re-despacho entre los centros de distribución (CP_1),
- penalidad esperada por la demanda insatisfecha en los centros de distribución (CP_2),
- penalidad esperada por el sobre stock que se produce en los centros de distribución (CP_3).

La función objetivo del modelo busca maximizar el resultado esperado de la explotación comercial, haciendo la diferencia entre los ingresos esperados y los componentes diversos de costos que debe afrontar, alguno de ellos esperados también. Queda expresada como

$$(59) \quad \text{máx } z = Vtas - Fab - CT - CP_1 - CP_2 - CP_3.$$

4.1. Ventas esperadas. Ingreso esperado por venta del producto en cada uno de los centros de distribución. Para cada uno de los centros de distribución, la cantidad vendida se determina mediante, por un lado, la suma de la cantidad recibida en el período y el stock remanente del período anterior, menos el stock remanente al final del período. Para el período inicial no se considera stock anterior.

Para cada centro de distribución de la localidad indexada por i , para cada uno de los escenarios $k = 1, \dots, K$, se determina la venta total del centro de distribución indexado por i para el escenario k , multiplicando la cantidad vendida (detallada en el párrafo anterior) en el centro por su precio de venta (π_i).

Para establecer la venta total esperada del centro de distribución de la localidad indexada por i se suma el producto de la venta del centro indexado por i para el escenario k por la probabilidad de ocurrencia del escenario k (p_k).

Para establecer la venta esperada total de la operación se suman las ventas esperadas de todos los I centros de distribución.

$$(60) \quad Vtas = \sum_{i \in CD} \sum_{k=1}^K \left\{ p_k \pi_i \left[\sum_{n=2}^N \left[\left(\sum_{f \in CF} x_{fi}^n \right) + w_{ik}^{n-1} - w_{ik}^n \right] + \left(\sum_{f \in CF} x_{fi}^1 \right) - w_{ik}^1 \right] \right\}$$

4.2. Costos de fabricación. Se establece multiplicando el costo unitario de fabricación por el tamaño del lote, y por la cantidad de lotes que se fabrican. Para cada centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f , y para cada período $n = 1, \dots, N$ se multiplica el costo unitario de fabricación (csf_f) por la cantidad de unidades por lote (tlf), por la cantidad de lotes que se fabrican ($z f_f^n$) en el período n .

$$(61) \quad Fab = \sum_{f \in CF} \sum_{n=1}^N csf_f tl_f z f_f^n$$

4.3. Costos de transporte desde los centros de fabricación a los centros de distribución. Por cada centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f , por cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i , con $n = 1, \dots, N$, se multiplica el costo de transportar un camión completo desde la localidad indexada por f hacia la localidad indexada por i por la cantidad de camiones que se despachan entre dichas localidades durante el período n .

$$(62) \quad CT = \sum_{f \in CF} \sum_{i \in CD} \sum_{n=1}^N tt_{fi} z c_{fi}^n$$

4.4. Penalidad por re-despachos entre los centros de distribución. Redistribuir unidades entre los centros de distribución es posible, pero, a los efectos logísticos no es deseable, por lo cual se penalizan con un valor. Para cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i se multiplica su penalidad (rd_i) por la suma de las unidades enviadas a cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por q , perteneciente al conjunto de centros de distribución (CD) pero distinto de i , en todo período $n = 1, \dots, N$.

$$(63) \quad CP_1 = \sum_{i \in CD} rd_i \left(\sum_{\substack{q \in CD, \\ i \neq q}} \sum_{n=1}^N rd_{iq}^n \right)$$

4.5. Penalidad esperada por la demanda insatisfecha que se produce en los centros de distribución. La demanda insatisfecha en los centros de distribución depende del escenario considerado, por lo cual, se toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia del mismo. Para cada centro de distribución ubicado en la localidad indexado por i , $k = 1, \dots, K$, $n = 1, \dots, N$ se multiplica la penalidad

del centro de distribución i por la demanda insatisfecha en el centro de distribución i para el período n en la realización del escenario k por la probabilidad de ocurrencia del escenario k .

$$(64) \quad CP_2 = \sum_{i \in CD} r_i \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N y_{ik}^n p_k \right)$$

4.6. Costo de mantener el stock en el centro de distribución. Para cada centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i perteneciente al conjunto de centros de distribución CD , suma el producto de la penalidad por exceso de stock sd_i por la suma de todas las unidades que permanecen en el stock en el centro de distribución al final de cada período, la cual se obtiene sumando para $n = 1, \dots, N$.

$$(65) \quad CP_3 = \sum_{i \in CD} sd_i \left(\sum_{n=1}^N zt_i^n \right)$$

5. Restricciones

5.1. Centros de fabricación.

5.1.1. Stock al finalizar cada período con excepción del primero ($n > 1$).

Para todos los períodos con excepción del primero el stock existente en el centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f en el período anterior ($n - 1$) es incrementado por los lotes de fabricación realizados en el período n y reducido por los envíos que se realizan a los centros de distribución intermedios durante el mismo período n para conformar el stock al final de período n .

$$(66) \quad z s_f^{n-1} + t l_f z f_f^n - \left\{ k t t \sum_{i \in CD} x_{fi}^n \right\} = z s_f^n \quad \forall (n, f) \in \{2, \dots, N\} \times CF$$

5.1.2. Stock al finalizar el primer período ($n = 1$).

Para el primer período se plantea idéntica expresión considerando el parámetro que indica el stock pre-existente if al inicio de las operaciones en el centro de fabricación.

$$(67) \quad if_f + tl_f z f_f^1 - \left(ktt \sum_{i \in CD} x_{fi}^1 \right) = z s_f^1 \quad \forall f \in CF$$

5.1.3. Capacidad de almacenamiento en los centros de fabricación.

Al final de cada período el stock no debe superar la capacidad de almacenamiento.

$$(68) \quad z s_f^n \leq cp_f \quad \forall (f, n) \in CF \times \{1, \dots, N\}$$

5.1.4. Capacidad máxima de producción en los centros de fabricación.

En cada período, la cantidad de lotes de producción terminados no puede superar la capacidad máxima de producción del centro de fabricación.

$$(69) \quad z f_f^n \leq cp_f \quad \forall (f, n) \in CF \times \{1, \dots, N\}$$

5.2. Envío de los camiones desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución.

5.2.1. Camiones enviados en cada período con excepción del primero ($n > 1$).

La cantidad de producto que se envía desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución es, a lo sumo, la cantidad de producto existente al final del período anterior en ese centro de fabricación.

$$(70) \quad ktt \left(\sum_{i \in CD} x_{fi}^n \right) \leq z s_f^{n-1} \quad \forall (n, f) \in \{2, \dots, N\} \times CF$$

5.2.2. *Camiones enviados en el primer período ($n = 1$).*

Idénticamente, la cantidad de producto que se envía desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución en el primer período es, a lo sumo, la cantidad inicial existente en el centro de fabricación.

$$(71) \quad ktt \left(\sum_{i \in CD} x_{fi}^1 \right) \leq if_f \quad \forall f \in F$$

5.3. Stock en los centros de distribución.

5.3.1. *Capacidad de almacenamiento.*

En todo momento el stock sobrante al final de un período en un centro de distribución no puede superar la capacidad de almacenamiento del centro de distribución en ningún escenario.

$$(72) \quad w_{ik}^n \leq cap_i \quad \forall (i, k, n) \in CD \times K \times \{1, \dots, N\}$$

5.4. Satisfacción de la demanda.

5.4.1. *Ajuste de la demanda insatisfecha o del sobrante de stock para cada período con excepción del primero ($n > 1$).*

En cada centro de distribución, la demanda debe ser igual al sobrante de stock del período anterior más el producto recibido en el período, descontando la demanda insatisfecha del período y sumando el exceso de stock del período. Dado que la demanda es diferente para las distintas realizaciones de los escenarios, los valores de la variable stock y demanda insatisfecha también lo son.

$$(73) \quad w_{jk}^{n-1} - w_{jk}^n + y_{jk}^n + \sum_{f \in CF} x_{fi}^n = d_{ik}^n \quad \forall (i, n, k) \in CD \times \{2, \dots, N\} \times \{1, \dots, K\}$$

5.4.2. *Ajuste de la demanda insatisfecha o del sobrante de stock para el primer período ($n = 1$).*

La demanda del primer período debe ser igual al producto recibido en el período, compensado por la demanda insatisfecha del período o por el stock al final del período.

$$(74) \quad y_{ik}^1 - w_{ik}^1 + \sum_{f \in CF} x_{fi}^1 = d_{ik}^1 \quad \forall (i, k) \in CD \times \{1, \dots, K\}$$

6. Evaluación preliminar de performance

Esta sección tiene dos propósitos, a saber

- conocer el efecto que se produce sobre el valor de la función objetivo concentrar la demanda en los centros de distribución reduciendo el alcance de la optimización dejando de lado el tramo de la distribución local desde los centros de distribución a los centros de consumo,
- observar el comportamiento de CPLEX al resolver el modelo planteado en este capítulo en cuanto a su capacidad para obtener la solución óptima y a la evolución del gap entre solución dual y primal a medida que avanza sus iteraciones.

Para conocer el efecto sobre la función objetivo se comparan, en ambos modelos, el resultado de la relajación lineal experimentando con cantidades de escenarios comprendidos entre 10 y 160 inclusive a incremento de 10 escenarios.

En la Figura [4.2](#) se puede observar que el resultado operativo obtenido por el modelo CD (descrito en este capítulo) es superior al resultado obtenido por el modelo en CC (Capítulo [3](#)). Esta divergencia se encuentra en un rango del 18 a 22 % disminuyendo a medida que se incrementa la cantidad de escenarios que participan en la optimización. En una subfigura se observan los resultados del modelo CD y del modelo CC en función de la cantidad de escenarios considerados y en la otra se ve el cociente entre el resultado operativo del modelo CD y el del modelo

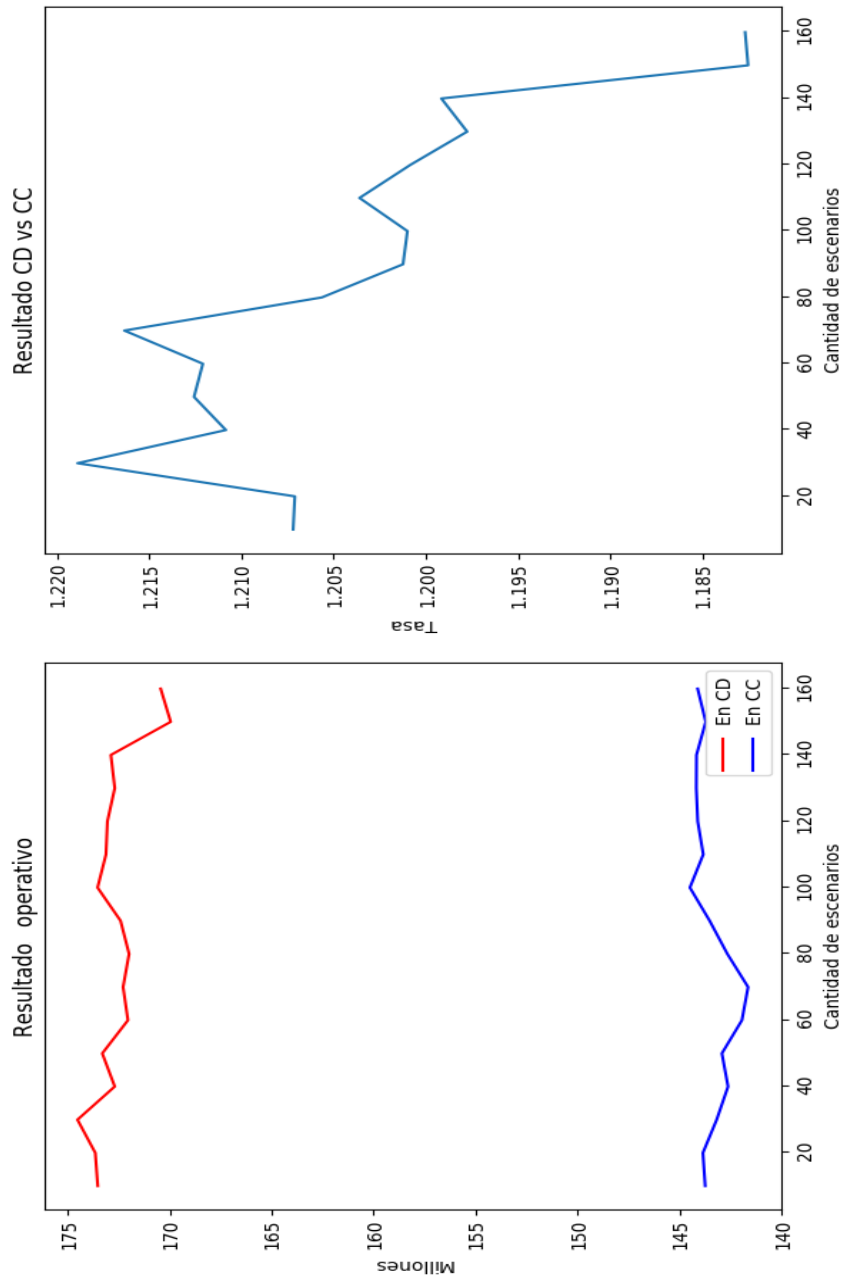


FIGURA (4.2). Comparación entre el resultado del modelo CD vs el modelo en CC.

CC en función de la cantidad de escenarios. Observar que, en estos gráficos y los siguientes, el centro de coordenadas $(0, 0)$ no está incluido a los efectos de observar el comportamiento de los valores, el eje y no comienza en 0.

En la Figura 4.3 se puede observar que los ingresos por ventas obtenidos por el modelo CD (descrito en este capítulo) superan a los ingresos por ventas presentados por el modelo en CC (Capítulo 3). Esta diferencia se encuentra en un rango del 15 a 19% y se puede deber a la compensación de la variabilidad de la demanda en los centros de consumo que se produce cuando ésta se concentra en el centro de distribución más cercano.

En la Figura 4.4 se puede observar que los costos de fabricación producidos por el modelo CD (descrito en este capítulo), también superan a los costos de fabricación obtenidos por el modelo en CC (Capítulo 3). Esta diferencia se encuentra en un rango del 3 a 11%.

En cuanto al ratio resultados / ventas que se observa en la Figura 4.5 presenta una mejor performance para el modelo CD (descrito en este capítulo) respecto al modelo en CC (Capítulo 3). Se observa que los valores de este ratio tiende a converger a medida que aumenta la cantidad de escenarios. La brecha entre ambos modelos se encuentra entre el 1 y 5%.

Se puede interpretar que concentrar la demanda en los centros de distribución produce un efecto de compensación de la variabilidad de la demanda en los centros de consumos haciendo que la misma se amortigüe en los centros de distribución. Por ejemplo, supongamos que en un mismo período en dos centros de consumo cuyas demandas se han concentrado en el mismo centro de distribución, si en una de ellas se produce una demanda insatisfecha de una determinada cantidad de unidades y en la otra un excedente de stock de la misma cantidad de unidades, al considerar la demanda en el centro de distribución no se produciría ni demanda insatisfecha ni excedente de stock.

Hasta acá, se ha trabajado con ambas relajaciones lineales pasando, a continuación, a realizar unos experimentos intentando que CPLEX encuentre solución óptima al modelo entero descrito en este capítulo (modelo CD).

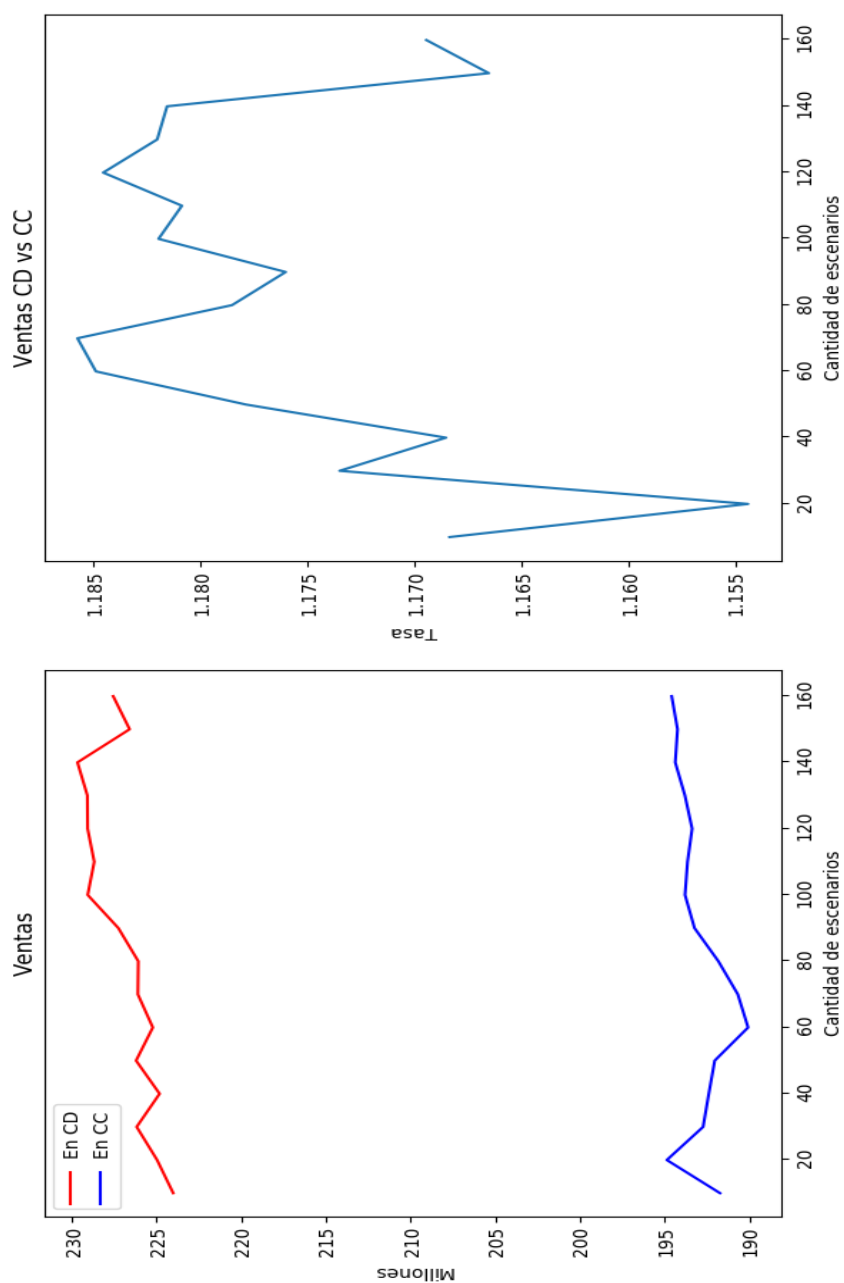


FIGURA (4.3). Comparación entre las ventas generadas por el modelo CD vs las generadas por el modelo en CC.

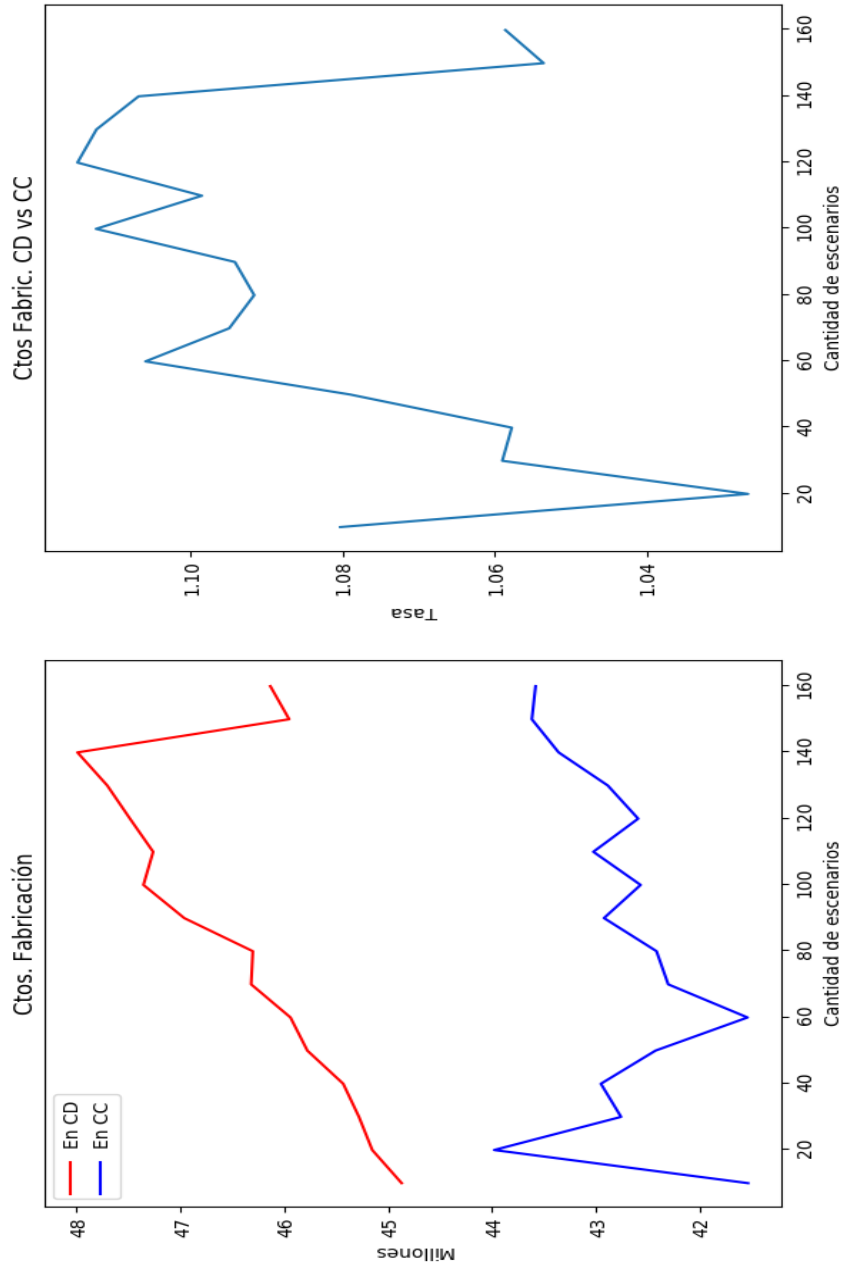


FIGURA (4.4). Comparación entre los costos totales de fabricación producidos por el modelo CD vs los producidos por el modelo en CC.

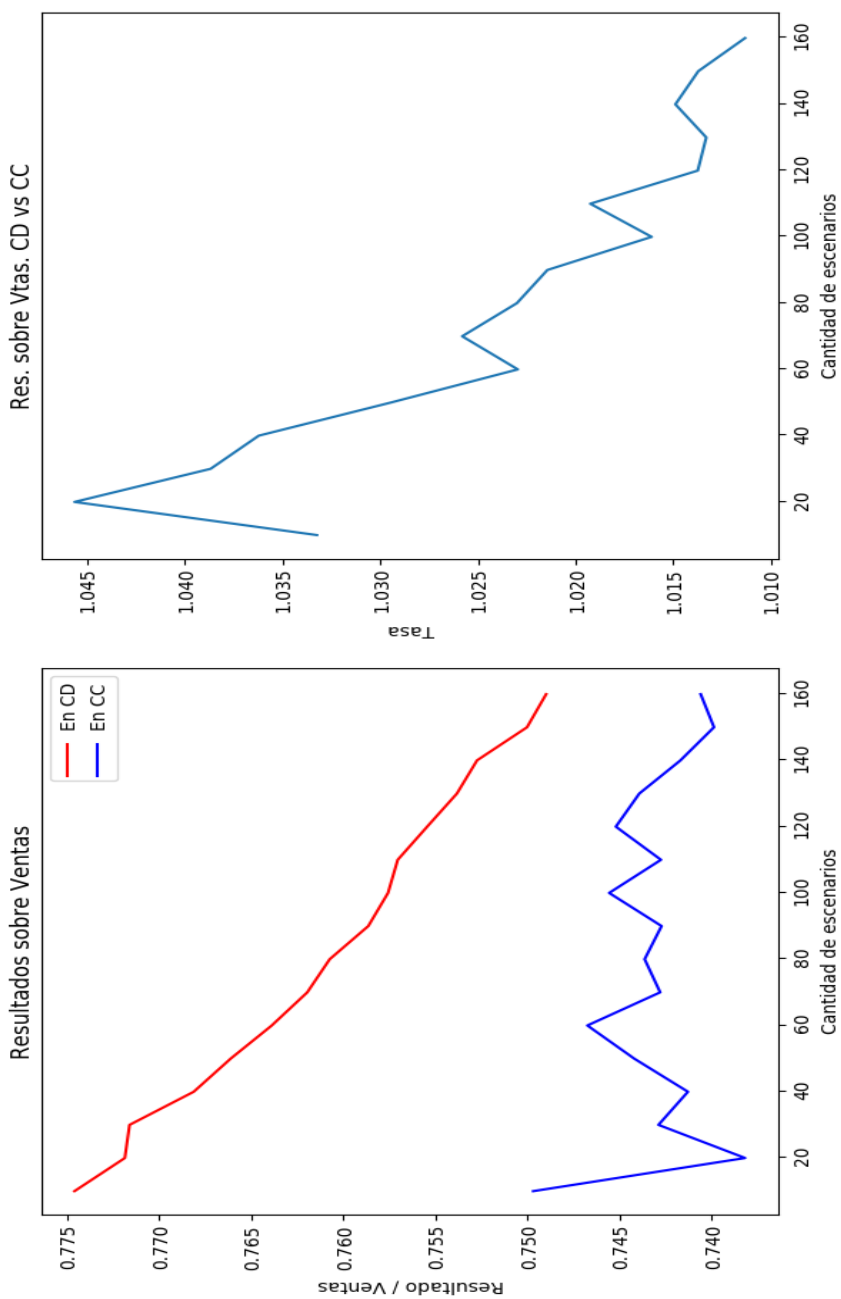


FIGURA (4.5). Comparación del indicador resultados / ventas del modelo CD vs el correspondiente al modelo en CC.

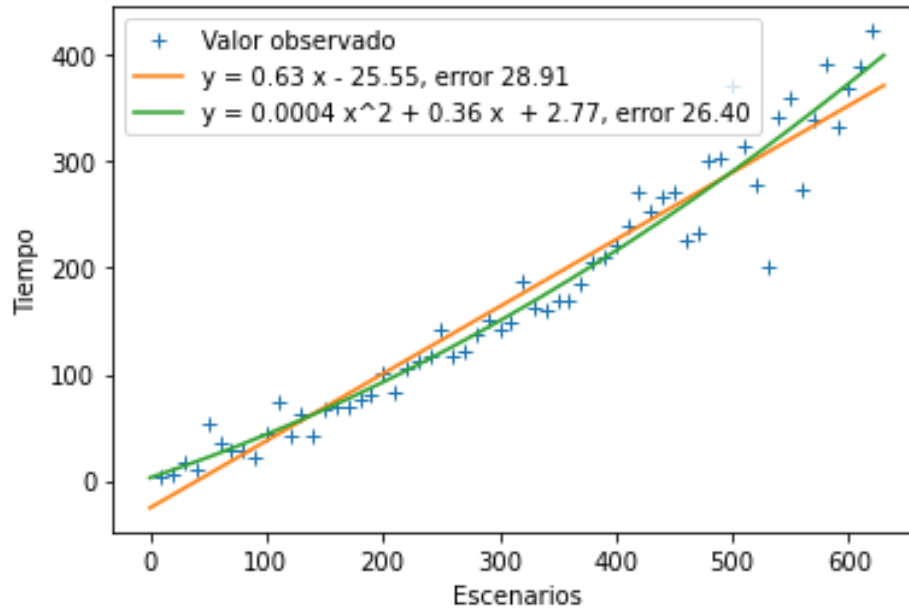


FIGURA (4.6). Tiempo de ejecución de CPLEX hasta encontrar una solución con un gap inferior al 2%.

Se ve que pasados 20 minutos de tiempo de ejecución no se alcanza la solución óptima. En el Apéndice [II](#) se pueden encontrar cuatro logs de las ejecuciones de CPLEX para 10, 210, 420 y 620 escenarios, en donde se puede ver que comienzan con soluciones inaceptables y rápidamente pasan a soluciones con gaps pequeños sin pasar por valores intermedios.

En cuanto a los tiempos de ejecución para encontrar una solución aceptable, definiendo la misma como la que tiene un gap inferior al 2% se puede ver en la Figura [4.6](#) el tiempo que demora CPLEX en encontrar una solución con un gap inferior al 2% en función de la cantidad de escenarios que se contemplan en el modelo. Se han buscado funciones de ajuste a los valores hallando una aproximación lineal con pendiente de 0.63 y un error estándar de la estimación de 28.91 segundos y otra función de ajuste cuadrática con pendiente también positiva $0.0004x + 0.36$ y un error estándar de la estimación, levemente inferior, de 26.4 segundos.

Por otra parte, la cota dual empieza siendo buena en las diferentes instancias para las cuales varía la cantidad de escenarios que considera el modelo, y luego de

un tiempo se ajusta el valor de la cota primal obteniendo un gap inferior al 2%. Esto se puede observar en la Figura 4.7 para las instancias de 10, 210, 420 y 620 escenarios. Es interesante ver en esa figura que la diferencia inicial entre ambas cotas es mayor a medida que incrementamos la cantidad de escenarios, al igual que se incrementa el tiempo que se demora la cota primal en acercarse a la cuota dual, las cuales nunca llegan a coincidir en los experimentos realizados.

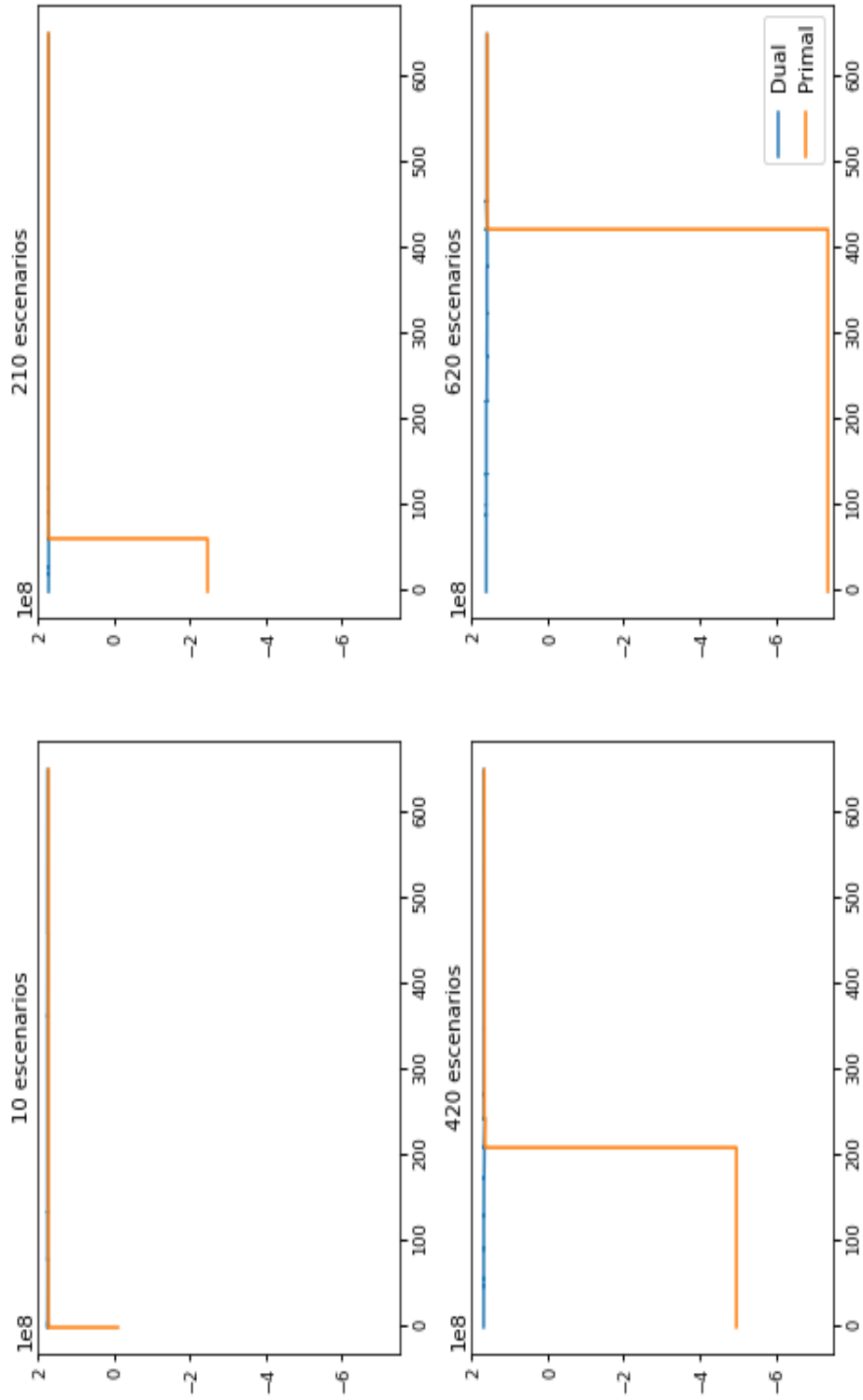


FIGURA (4.7). Diferencias entre las cotas dual y primal con evolución en el tiempo para las instancias de 10, 210, 420 y 620 escenarios.

Heurísticas

En el ejercicio numérico realizado en la Sección 6 del capítulo anterior se puede ver que CPLEX no entrega valores óptimos para el problema entero-mixto en un tiempo de cómputo aceptable. Si usamos como indicador de la calidad de la solución hallada en un determinado tiempo a la distancia porcentual entre las cotas del problema primal y dual (gap) se ve que, a medida que se incrementa la cantidad de escenarios que participan en el problema el tiempo requerido para encontrar una solución con un gap inferior al 2% se incrementa.

Por otra parte, de la observación de los logs producidos por CPLEX, algunos de ellos se pueden ver en el Apéndice II se identifica que las cotas de los problemas primal y dual comienzan siendo son muy diferentes determinando un gap importante (ver gráficamente la Figura 4.7 del capítulo anterior) y pasado un tiempo de cómputo se acercan abruptamente manteniéndose cercanas hasta el tiempo límite establecido y con poca mejora. El tiempo que transcurre desde el comienzo hasta que se produce la aproximación de ambas cotas se incrementa a medida que aumenta la cantidad de escenarios considerados.

Igualmente, el gap de las soluciones inicialmente encontradas también crece a medida que se incrementa la cantidad de escenarios en consideración en el modelo siendo la cota primal la inapropiada para la solución del problema.

Esta diferencia y el hecho de que la cota dual es ajustada respecto al óptimo entero, y en cambio la cota primal no lo es, sugiere que una heurística¹ ajustada a las características del problema podría arrojar resultados satisfactorios.

¹La palabra *Heurística* tiene su origen en la antigua palabra griega *heuriskien*, que significa el arte de descubrir nuevas estrategias (reglas) para resolver problemas.

Las *heurísticas* ([31]) son una clase de algoritmos que encuentran soluciones razonablemente buenas en un tiempo de cómputo aceptable. Por lo general se encuentran diseñadas para resolver problemas específicos [66].

En este capítulo se describen tres heurísticas para el problema del modelo de distribución / fabricación multiperíodo que concentra la demanda de las localidades de consumo en aquel centro de distribución que se encuentra más cercano a ella (modelo CD). Éstas son:

- heurística de dos fases,
- heurística de ajuste compensado con avance temporal,
- heurística de ajuste por redondeo.

La heurística de *dos fases* parte de la solución de la relajación lineal, aplicando en una primer instancia un ajuste compensado de los envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución (X), ajustando los mismos hacia atrás en el tiempo y reelaborando los valores de la cantidad de lotes de fabricación realizados (ZF). Con posterioridad, se realiza una búsqueda sobre las penalidades que impactan en la función objetivo para intentar encontrar mejoras en su valor realizando ajustes en los envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución (X) guiados por el valor de las penalidades por demanda insatisfecha (incrementando el envío) y/o por excedente de stock (disminuyendo el envío) que participan en la evaluación de la función objetivo.

La segunda heurística instrumentada inicia, también, con la solución obtenida por la relajación lineal realizando un ajuste compensado de los envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución (X) ajustando los mismos hacia atrás en el tiempo y reelaborando los valores de la cantidad de lotes de fabricación realizados (ZF) que se producen dentro de una ventana de tiempo v . Luego de fijar los valores durante esta ventana se resuelve nuevamente el modelo relajado, continuando el proceso hasta que se completan todos los períodos del modelo.

Por último se implementa una heurística que, también partiendo de la solución de la relajación lineal, aplica un ajuste por redondeo reiteradamente sobre

las variables del envío de camiones desde los centros de fabricación a los centros de distribución (X) y sobre la cantidad de lotes de fabricación realizados (ZF). El ajuste se realiza tomando un valor ϵ para determinar la magnitud del ajuste a realizar. Si la parte decimal del valor de la variable no entera es menor e igual a ϵ ajusta al entero inferior. En cambio, si, la parte decimal es superior a $1 - \epsilon$ ajusta al entero superior. Luego de fijar los valores se realiza nuevamente la optimización de la relajación lineal y se repite el ajuste mencionado.

1. Heurística de dos fases

Esta heurística parte de la solución de la relajación lineal a la cual se le realizan ajustes en dos etapas o fases:

- Fase 1: ajuste compensado de envíos,
- Fase 2: búsqueda de mejoras guiada por penalidad.

Dado que la cantidad de camiones que se envían desde un centro de fabricación a un centro de distribución (X) debe ser, por su naturaleza, una variable entera, se puede anticipar en el tiempo el envío de aquellas cantidades fraccionarias y, dado que esa anticipación puede producir valores que no sean soluciones factibles debido a la cantidad de lotes de fabricación a producir (ZF), es necesario recalcular estos valores.

Por otra parte, dado que se incurre en penalidades por demanda insatisfecha (Y) y/o excedente de stock (W) en un centro de distribución, podría aportar algún beneficio explorar la vecindad de la cantidad de camiones que se envían al centro de distribución (X) de tal forma de reducir esas penalidades y así, mejorar el valor de la función objetivo.

El *ajuste compensado de envíos* se encarga de anticipar los valores fraccionarios en tanto que la fase de *búsqueda de mejoras guiada por penalidad* busca mejorar el valor de la función objetivo reduciendo las penalidades.

1.1. Ajuste compensado de envíos. Durante esta fase se ajustan los envíos desde los centros de fabricación hasta los centros de distribución regionales (X) adelantando el envío para obtener la misma cantidad enviada final pero utilizando valores enteros. Por ejemplo, supongamos únicamente cuatro períodos con los siguientes valores de los envíos (X)

n	X
1	0,5
2	0,3
3	0,4
4	0,7

CUADRO (5.1). Valores de la variable X en la solución de la relación lineal.

Luego de esta fase los valores se ajustan adelantando las fracciones no enteras para períodos anteriores quedando los valores como se muestra en el Cuadro 5.2

n	X
1	1
2	0
3	1
4	0

CUADRO (5.2). Valores de la variable X obtenidos como resultado del ajuste, para el ejemplo del Cuadro 5.1

A continuación se realiza el ajuste de las demás variables para hacer consistentes los valores de las variables, como la cantidad de lotes de fabricación (ZF), la demanda insatisfecha (Y), el excedente de stock (W), estas últimas dependientes de cada uno de los K escenarios.

Se van a realizar en secuencia tres procesos:

- ajuste de la cantidad a enviar,
- ajuste de la cantidad a producir,
- readecuación de las variables dependiente de los escenarios.

1.1.1. Ajuste de la cantidad a enviar.

Prerequisitos

- $X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1I}^1, x_{21}^1, \dots, x_{fi}^n, \dots, x_{FI}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar de un centro de fabricación a un centro de distribución tal como se definió en la Sección 3 del Capítulo 4.

Salida

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar con los valores fraccionarios de la variable de entrada anticipados en el tiempo.

El algoritmo de esta fase de la heurística, cuyo pseudo-código se describe en el Algoritmo 5.1 ajusta la variable cantidad de camiones a enviar desde un centro de fabricación a un centro de distribución obteniendo como resultado una variable entera adelantando en el tiempo la parte fraccionaria de los envíos determinados por la relajación lineal.

Cuando la variable que indica la cantidad acumulada hasta un período n (*Acumulados*) de la variable con el resultado de la relajación lineal X supera a la variable que acumula los envíos enteros \tilde{X} con anterioridad al período n inclusive (*Enteros Acumulados*) se incrementa esta última en el mínimo entero mayor o igual a la diferencia entre el acumulado de la variable que surge de la relajación lineal y el acumulado de la variable entera resultante. Ver la línea 8 del Algoritmo 5.1.

1.1.2. Ajuste de la cantidad a producir.

Luego del ajuste de la cantidad a enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución a los efectos de no generar soluciones no factibles se requiere que se ajusten de los lotes de fabricación en consecuencia.

Algoritmo 5.1 Ajuste de la cantidad a enviar

```

1: for cada centro de fabricación  $f \in CF$  do
2:   for cada centro de distribución  $i \in CD$  do
3:      $Acumulados := 0$ 
4:      $Enteros\ acumulados := 0$ 
5:     for cada período  $n := 1, \dots, N$  do
6:        $Acumulados := Acumulados + x_{fi}^n$ 
7:       if  $Acumulados > Enteros\ acumulados$  then
8:          $\tilde{x}_{fi}^n = \lceil Acumulados - Enteros\ acumulados \rceil$ 
9:          $Enteros\ acumulados := Enteros\ acumulados + \tilde{x}_{fi}^n$ 
10:      else
11:         $\tilde{x}_{fi}^n := 0$ 
12:      end if
13:    end for
14:  end for
15: end for

```

El algoritmo expresado en pseudo-código con el número [5.2](#) se asegura que el producto que se despache en los camiones completos \tilde{X} se encuentre producido para ese período.

Prerequisitos

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución generados en el Punto [L.1.1](#).
- $TL : CF \rightarrow \mathbb{R}$: Tamaños de lotes de fabricación aplicables a cada centro de fabricación tal como se ha definido en el Punto [1](#) del Capítulo [3](#).
- ktt : Cantidad de unidades de producto que se trasladan en un viaje desde un centro de fabricación hacia un centro de distribución.

Salida

- $ZF = \{z_{f1}^1, \dots, z_{f1}^N, z_{f2}^1, \dots, z_{ff}^n, \dots, z_{fF}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indica la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados en el centro de fabricación recalculados a partir de las nuevas cantidad a despachar.

Algoritmo 5.2 Ajuste de la cantidad a producir

```

1: for cada centro de fabricación  $f \in CF$  do
2:   for cada período  $n := 1, \dots, N$  do
3:      $viajes := \sum_{i \in I} \tilde{x}_{fi}^n$ 
4:      $z f_f^n := \lceil viajes * \frac{ktt}{u_f} \rceil$ 
5:   end for
6: end for

```

1.1.3. Reajuste de las variables dependiente de los escenarios.

Terminado el ajuste de los lotes de fabricación se realiza un algoritmo cuya finalidad es reajustar los valores de aquellas variables de decisión cuyo valor depende del escenario que se considera (Algoritmo 5.3), específicamente la demanda insatisfecha (Y) y el excedente de stock (W).

A modo de ejemplo se puede ver en el Cuadro 5.3 los resultados de este algoritmo para un escenario determinado suponiendo que la cantidad de unidades despachadas en un viaje del transporte (ktt) es 10 unidades, para el primer período la cantidad de camiones a despachar de la fábrica al centro de distribución del ejemplo son 3 unidades las que transportan 10 unidades cada uno con un total de 30 unidades, en ese período la demanda asignada para el escenario que se está tratando son 15 unidades pudiéndose satisfacer en forma completa ($Y = 0$) y quedando en stock al final de ese período 15 unidades.

Para el período siguiente las unidades recibidas son idénticas a las demandadas y vendidas quedando el mismo saldo que en el período anterior.

Para el período 3, el centro de distribución no recibe viajes desde el centro de fabricación y tiene una demanda de 25 unidades, las cuales no se pueden satisfacer totalmente dado que el stock al finalizar el período anterior fue de 15 unidades que se venden (ZV) y quedando las 10 restantes como demanda insatisfecha (Y).

En el cuarto período, nuevamente, vuelve a quedar demanda insatisfecha, no siendo así en el quinto y último período del ejemplo.

Prerequisitos

n	\tilde{X}	DD	ZV	$Saldo$	Y	W
1	3	15	15	15	0	15
2	2	20	20	15	0	15
3	0	25	15	0	10	0
4	1	22	10	0	12	0
5	2	17	17	3	0	3

CUADRO (5.3). Ejemplo del comportamiento del algoritmo de reajuste de las variables dependientes de los escenarios (Algoritmo 5.3) para un escenario determinado durante los períodos 1 a 5.

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución generados en el Punto 1.1.1.
- $DD : CD \times \mathbb{N} \times K \rightarrow \mathbb{R}$: Demanda de la zona de influencia del centro de distribución tal como se ha definido en el Punto 1 del Capítulo 3.

Salida

- $ZV = \{zv_{11}^1, zv_{12}^1, \dots, zv_{1I}^1, zv_{21}^1, \dots, zv_{ik}^n, \dots, zv_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad vendida en un centro de distribución para cada período y escenario tal como se ha definido en la Sección 3 del Capítulo 4.
- $Y = \{y_{11}^1, y_{21}^1, \dots, y_{I1}^1, y_{11}^2, \dots, y_{I1}^2, \dots, y_{ik}^n, \dots, y_{IK}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas correspondientes a las demandas insatisfechas de cada centro de distribución para cada período y escenario tal como se ha definido en la Sección 3 del Capítulo 4.
- $W = \{w_{11}^1, w_{21}^1, \dots, w_{I1}^1, w_{11}^2, \dots, w_{I1}^2, \dots, w_{ik}^n, \dots, w_{IK}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas con los excedentes de stock en cada centro de distribución para cada período y escenario definido en la Sección 3 del Capítulo 4.

En forma interna se utiliza la variable *Saldo* (ejemplificada en una columna en el Cuadro 5.3) para obtener el saldo del producto al final de cada período.

Algoritmo 5.3 *Reajuste de las variables dependientes de los escenarios*

```

1: for cada escenario  $k := 1, \dots, K$  do
2:   for cada centro de distribución  $i \in CD$  do
3:      $saldo := 0$ 
4:     for cada período  $n := 1, \dots, N$  do
5:        $saldo := saldo + ktt * \sum_{f \in F} \tilde{x}_{fi}^n$ 
6:       if  $dd_{ik}^n > saldo$  then
7:          $zv_{ik}^n := saldo$ 
8:       else
9:          $zv_{ik}^n := dd_{ik}^n$ 
10:      end if
11:       $saldo := saldo - zv_{ik}^n$ 
12:       $y_{ik}^n := dd_{ik}^n - zv_{ik}^n$ 
13:       $w_{ik}^n := saldo$ 
14:    end for
15:  end for
16: end for

```

1.2. Búsqueda de mejoras guiada por penalidad. Durante esta segunda fase se evalúan las penalidades por demanda insatisfecha (Y) y las correspondientes al exceso de stock (W) tomando aquellas ternas { centro de distribución, período, escenario } que tienen mayor impacto en el valor de la función objetivo realizando ajustes en los envíos previstos intentando reducir dicho impacto.

Verifica si la solución resultante de incrementar o decrementar un viaje hacia ese centro de distribución desde un centro de fabricación produce un solución mejor. De resultar así, se adopta esa solución. En caso de que no se produzca una mejor solución se incorpora en una lista tabú la tupla conformada por centro de distribución, período y cambio realizado. Este procedimiento se repite una cantidad fija de veces.

En resumen, se trata de un algoritmo de búsqueda de mejores soluciones en donde la determinación de la próxima solución se establece evaluando las penalidades que soporta la función objetivo de la solución alcanzada en un paso determinado.

A modo de ejemplo podemos ver en el Cuadro 5.4 los valores de algunas cantidades que participan en la función objetivo, suponiendo que para valorizar las unidades se toma como precio de venta \$650,00, como penalidad unitaria por demanda insatisfecha \$3,25 y como penalidad unitaria por excedente de stock \$0,75. Si formulamos la función objetivo como *Venta – Demanda insatisfecha – Excedente de stock* = \$50146.25. Se puede ver que la mayor penalidad se encuentra en el período 4 para la *Demanda insatisfecha* por un monto de \$39,00. Para no incurrir en esta penalidad se debería enviar un viaje más $\tilde{X} := \tilde{X} + 1$ y evaluar el monto de la función objetivo con este nuevo valor de \tilde{X} previo el recálculo de todas las demás variables y verificación de factibilidad de la solución.

n	\tilde{X}	Unidades Recibidas	DD	ZV	Y	W	Venta	Demanda insatisfecha	Excedente de Stock
1	3	30	15	15	0	15	\$9750,00		\$11,25
2	2	20	20	20	0	15	\$13000,00		\$11,25
3	0	0	25	15	10	0	\$9750,00	\$32,50	
4	1	10	22	10	12	0	\$6500,00	\$39,00	
5	2	20	17	17	0	3	\$11050,00		\$2,25

CUADRO (5.4). Estado inicial de algunas de las cantidades de un escenario dado, con excepción de \tilde{X} y las unidades recibidas, que participan en la función objetivo al comienzo del algoritmo búsqueda de mejoras guiada por penalidad (Algoritmo 5.4) durante los períodos 1 a 5.

En el Cuadro 5.5 se ve disminuida la penalidad por demanda insatisfecha en el período 4 bajando a \$6.50, el valor de la función objetivo (contemplando solo las cantidades mencionadas en el párrafo anterior) mejora alcanzando \$56613.75. Ahora, la mayor penalidad pasa a estar en el período 3, también corresponde a *Demanda insatisfecha*, para corregirla podemos enviar un viaje más $\tilde{X} := \tilde{X} + 1$ y evaluar si se mejora la función objetivo o no.

El agregado de un viaje para el período 3 que se ve en el Cuadro 5.6 hace que no exista ningún tipo de penalidad en ese período, aumentando el valor de la función

n	\tilde{X}	Unidades Recibidas	DD	ZV	Y	W	Venta	Demanda insatisfecha	Excedente de Stock
1	3	30	15	15	0	15	\$9750,00		\$11,25
2	2	20	20	20	0	15	\$13000,00		\$11,25
3	0	0	25	15	10	0	\$9750,00	\$32,50	
4	2	20	22	20	2	0	\$13000,00	\$6,50	
5	2	20	17	17	0	3	\$11050,00		\$11,25

CUADRO (5.5). Cantidades de un escenario dado luego del primer ajuste en la cantidad de viajes \tilde{X} en el período 4.

objetivo a \$63081.25. Ahora, las mayores penalidades se encuentran en los períodos 1, 2 y 5 por *Excedente de stock*, para tratar de disminuirla podemos enviar un viaje menos $\tilde{X} := \tilde{X} - 1$ en el período 1.

n	\tilde{X}	Unidades Recibidas	DD	ZV	Y	W	Venta	Demanda insatisfecha	Excedente de Stock
1	3	30	15	15	0	15	\$9750,00		\$11,25
2	2	20	20	20	0	15	\$13000,00		\$11,25
3	1	10	25	25	0	0	\$16250,00		
4	2	20	22	20	2	0	\$13000,00	\$6,50	
5	2	20	17	17	0	3	\$11050,00		\$11,25

CUADRO (5.6). Cantidades de un escenario dado luego del ajuste en la cantidad de viajes \tilde{X} en el período 3.

La disminución en un viaje en el período 1 se ve en el Cuadro 5.7. Si bien se disminuye la penalidad por *Excedente de stock* en ambos períodos, incrementa la *Demanda insatisfecha* del período 3 haciendo que el resultado de la función objetivo \$56598.75 sea inferior al hallado en el paso anterior. Se descarta la solución encontrada, se vuelve a trabajar sobre el Cuadro 5.6 y se indica en la lista tabú que el cambio realizado no mejora el resultado. Se procede a disminuir los envíos realizados en el período 2.

La disminución del envío en el período 2 se ve en el Cuadro 5.8 resultando la función objetivo también inferior a la hallada con los valores de las variables del Cuadro 5.6. Nuevamente se desecha la solución y se ingresa en la Lista tabú.

n	\tilde{X}	Unidades Recibidas	DD	ZV	Y	W	Venta	Demanda insatisfecha	Excedente de Stock
1	2	20	15	15	0	5	\$9750,00		\$3,75
2	2	20	20	20	0	5	\$13000,00		\$3,75
3	1	10	25	15	10	0	\$9750,00	\$32,50	
4	2	20	22	20	2	0	\$13000,00	\$6,50	
5	2	20	17	17	0	3	\$11050,00		\$2,25

CUADRO (5.7). Cantidades de un escenario dado luego del ajuste en la cantidad de viajes a realizar \tilde{X} en el período 1.

El proceso continúa hasta que se agota la cantidad de intentos de mejoras preestablecido o no se pueda encontrar una mejora que no se encuentre en la Lista tabú.

n	\tilde{X}	Unidades Recibidas	DD	ZV	Y	W	Venta	Demanda insatisfecha	Excedente de Stock
1	3	30	15	15	0	15	\$9750,00		\$11,25
2	1	10	20	20	0	5	\$13000,00		\$3,75
3	1	10	25	15	10	0	\$9750,00	\$32,50	
4	2	20	22	20	2	0	\$13000,00	\$6,50	
5	2	20	17	17	0	3	\$11050,00		\$11,25

CUADRO (5.8). Cantidades de un escenario dado luego del primer ajuste en la cantidad viajes a realizar \tilde{X} en el período 2.

Prerequisitos

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución según el Punto [1.1.1](#).

Los restantes prerequisites se definieron formalmente en la Sección [3](#) del Capítulo [3](#) específicamente:

- $Y = \{y_{11}^1, y_{21}^1, \dots, y_{I1}^1, y_{11}^2, \dots, y_{I1}^N, \dots, y_{ik}^n, \dots, y_{IK}^N\}$: Conjunto de variables de decisión correspondientes a las demandas insatisfechas en los centros de distribución.

- $W = \{w_{11}^1, w_{21}^1, \dots, w_{I1}^1, w_{11}^2, \dots, w_{I1}^2, \dots, w_{I1}^N, \dots, w_{ik}^n, \dots, w_{IK}^N\}$: Conjunto de variables de decisión de los excedentes de stock en cada centro de distribución.
- $R : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidades unitarias por demanda insatisfechas en el centro de distribución.
- $SD : CD \rightarrow \mathbb{R}$: Penalidades unitarias por permanencia en el stock del centro de distribución.
- $P : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$: Probabilidad de ocurrencia de cada uno de los escenarios.
- $CSF : CF \rightarrow \mathbb{R}$: costos de fabricación unitario de cada centro de fabricación.

Salida

Se ajustan las siguientes variables de decisión:

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Cantidad de camiones completos que se despachan de los centros de fabricación a los centros de distribución.
- $Y = \{y_{11}^1, y_{21}^1, \dots, y_{I1}^1, y_{11}^2, \dots, y_{I1}^2, \dots, y_{ik}^n, \dots, y_{IK}^N\}$: Demanda insatisfecha en los centros de distribución.
- $W = \{w_{11}^1, w_{21}^1, \dots, w_{I1}^1, w_{11}^2, \dots, w_{I1}^2, \dots, w_{ik}^n, \dots, w_{IK}^N\}$: Excedente de stock en los centros de distribución.
- $ZV = \{zv_{11}^1, zvx_{12}^1, \dots, zv_{1I}^1, zv_{21}^1, \dots, zv_{ik}^n, \dots, zv_{FI}^N\}$: Cantidades vendidas en cada centro de distribución.

En la línea 1 del Algoritmo [5.4](#) se identifica el centro de fabricación que tiene menor costo de fabricación unitario para que, en caso de que se necesite agregar envíos a un centro de distribución, se realice desde ese lugar.

En las líneas 2 a 4 se inicializan los valores de la cantidad actual a mejorar y de la lista tabú. Para cada uno de los intentos de mejora establecidos se realizan las líneas 6 a 27.

Las líneas 6 y 7 identifican la mayor penalidad que participa en el cálculo de la función objetivo para esa solución por demanda insatisfecha y por excedente de stock almacenado.

En la línea 8 se determina cual de las dos penalidades es superior, demanda insatisfecha o excedente de stock. Si esa condición resulta verdadera significa que la mayor penalidad se esta realizando por demanda insatisfecha, por lo cual, en la línea 9 se incrementa la cantidad de envíos en ese período desde el centro de fabricación de menor costo de producción.

Si la condición de la línea 8 es falsa significa que la mayor penalidad corresponde a exceso de stock, por lo tanto se descuenta un envío en el período en el cual se detecto la penalidad, o en un período anterior, desde aquel centro de fabricación que tenga previsto mayor cantidad de envíos (líneas 11 a 14).

Las líneas 16 y 17 ajustan el resto de las variables de decisión en forma acorde al cambio realizado en la solución.

Por último entre las líneas 18 y 29 se evalúa la factibilidad y la mejora en el valor de la función objetivo para la solución ajustada. Si se cumplen estas condiciones se acepta el cambio. En caso de no cumplir alguna de ellas se revierte el cambio realizado y se coloca la identificación del origen de cambio en la lista tabú.

Esta heurística propone adelantar las fracciones de camiones a enviar desde los centros de fabricación a los de distribución ajustando, en caso de ser necesario, la cantidad a fabricar para cubrir ese adelantamiento. Se puede ver como una anticipación del envío a realizar.

Se ajusta a un comportamiento habitual en las operaciones, adelantar un envío previendo que el producto será demandado en un período futuro cercano.

La segunda fase de búsqueda de mejoras guiadas por penalidad intenta ajustar el resultado de la operatoria cancelando o incorporando camiones despachados a los centros de distribución.

Algoritmo 5.4 *Búsqueda de mejoras guiada por penalidad*

```

1: Hallar  $f^*$  tal que  $csf_{f^*} = \min \{csf_f, f = 1 \dots F\}$ 
2:  $FO \leftarrow$  Valor de la función objetivo con las variables actuales
3: Valor a mejorar  $\leftarrow FO$ 
4: Lista tabú  $\leftarrow \{\}$ 
5: for  $t = 1 \dots intentos$  do
6:   Hallar  $(i^*, n^*, k^*)$ 
       tal que  $(y_{i^*, k^*}^{n^*} r_{i^*} p_{k^*}) = \max \{y_{i,k}^n r_i p_k : (i, n, k) \notin \text{Lista tabú}\}$ 
7:   Hallar  $(i^{**}, n^{**}, k^{**})$ 
       tal que  $(w_{i^{**}, k^{**}}^{n^{**}} sd_{i^{**}} p_{k^{**}}) = \max \{w_{i,k}^n sd_i p_k : (i, n, k) \notin \text{Lista tabú}\}$ 
8:   if  $y_{i^*, k^*}^{n^*} > w_{i^{**}, k^{**}}^{n^{**}}$  then
9:      $\tilde{x}_{f^* i^*}^{n^*} := \tilde{x}_{f^* i^*}^{n^*} + 1$ 
10:  else
11:    while  $\tilde{x}_{f^* i^*}^{n^*} = 0$ , para todo  $f \in CF$  do
12:       $n^* := n^* - 1$ 
13:    end while
14:    Descontar 1 del  $\max_{f \in CF} \{\tilde{x}_{f^* i^*}^{n^*}\}$ 
15:  end if
16:  Realizar Ajuste de la cantidad a producir
17:  Realizar Reajuste de las variables dependiente de los escenarios
18:  if La solución hallada no es factible then
19:    Reestablecer a la solución anterior
20:    Incorporar el intento de mejora en la Lista tabú
21:  else
22:     $FO \leftarrow$  Valor de la función objetivo con las variables actuales
23:    if  $FO > \text{Valor a mejorar}$  then
24:      Valor a mejorar  $\leftarrow FO$ 
25:    else
26:      Reestablecer a la solución anterior
27:      Incorporar el intento de mejora en la Lista tabú
28:    end if
29:  end if
30: end for

```

2. Heurística de ajuste compensado con avance temporal

La cantidad de envíos que se realizan de las fábricas a los centros de distribución debe ser una variable entera. Esta heurística propone ir ajustando los valores de esa variable por conjuntos de períodos contiguos y de ser necesario, en la cantidad de unidades que deben ser fabricadas para que se puedan realizar esos envíos. Es decir, va transformando a enteros los valores de ambas variables cubriendo una cantidad de períodos contiguos establecidos por un parámetro de la heurística (v).

Se instrumenta a partir de la solución óptima de la relajación lineal del modelo CD del Capítulo 4. En primer lugar se aplica un ajuste compensado para los envíos a realizar desde las fábricas a los centros de distribución para ventanas del tamaño de la cantidad de períodos determinada por el parámetro de la heurística v . A continuación se resuelve nuevamente el modelo relajado al cual se le han incorporado las restricciones que surgen del establecimiento de los valores que se fijaron en el período de la ventana. El proceso continúa hasta que se completan todos los períodos del modelo.

Prerequisitos

- N : Cantidad de períodos comprendidos en la optimización.
- v : Cantidad de períodos que comprende la ventana deslizante. Se ajustarán los próximos v períodos a partir de un período base inicial (comenzando con el período 1). Si los períodos faltantes a tratar son inferiores a v se ajusta la variable X para esos períodos solamente. Es decir, supongamos que la cantidad total de períodos comprendidos en la optimización es de 8 ($N = 8$) y la cantidad de períodos que comprende la ventana deslizante es 4 ($v = 4$) en un primer momento se ajustarán los envíos realizados entre el período 1 y 4 inclusive para luego realizar el ajuste para los períodos del 5 hasta el final.
- $X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1I}^1, x_{21}^1, \dots, x_{fi}^n, \dots, x_{FI}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar de un centro de fabricación a un centro de distribución tal como se definió en la Sección 3 del Capítulo 3.
- $ZF = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indica la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados tal como se ha definido en el Capítulo 3.

Se presupone que la relajación lineal del modelo CD tiene solución óptima factible.

Salida

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución generados en el Punto [1.1.1](#). Van fijando sus valores en cada ciclo de ajuste a enteros de los períodos que se encuentran comprendidos en la ventana definida.
- $\tilde{ZF} = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados en el centro de fabricación recalculados a partir de las nuevas cantidades a despachar. Al igual que \tilde{X} se van fijando los valores a medida que se ajustan las sucesivas ventanas.

En las líneas 1 y 2 del Algoritmo [5.5](#) se inicializan en vacío las variables de salida de la cantidad de camiones enviados desde los centros de fabricación y la lotes de fabricación a realizar.

Las líneas 5 y 7 resuelven la relajación lineal del modelo CD con los valores de las variables que se han ajustado a un valor entero incorporados como restricciones en el modelo. Por su parte las líneas 6 y 8 son las encargadas de llevar a un valor entero aquellos valores fraccionarios de las variables de entrada X y ZF para los períodos incluidos en la ventana que se está tratando en esa iteración.

Se realiza primero el ajuste en la cantidad de viajes (\tilde{X}) y luego se hace el ajuste en la cantidad de lotes de fabricación producidos (\tilde{ZF}) para que la resolución de la relajación lineal del modelo CD permita que se obtengan los nuevos valores de lotes de fabricación (ZF) considerando los nuevos valores ajustados a enteros de la ventana que se esta resolviendo en la iteración.

2.1. Resolver la relajación lineal con las variables fijadas indicadas en \tilde{X} y \tilde{ZF} .

Realiza el cálculo de la solución óptima de la relajación lineal ampliada del modelo, que se encuentra conformada por la relajación lineal del modelo con el agregado de las restricciones que corresponden a las variables que se van fijando a

Algoritmo 5.5 Ajuste compensado con avance temporal

```

1:  $\tilde{X} \leftarrow \emptyset$ 
2:  $\tilde{ZF} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $v_i \leftarrow 0$ 
4: while  $v_i < N$  do
5:   Resolver la relajación lineal con las variables fijadas indicadas en  $\tilde{X}$  y  $\tilde{ZF}$ 
6:   Ajustar la cantidad a enviar entre  $v_i + 1$  y  $v_i + v$  ampliando  $\tilde{X}$ 
7:   Resolver la relajación lineal con las variables fijadas indicadas en  $\tilde{X}$  y  $\tilde{ZF}$ 
8:   Ajustar la cantidad a fabricar entre  $v_i + 1$  y  $v_i + v$  ampliando  $\tilde{ZF}$ 
9:    $v_i \leftarrow v_i + v$ 
10:   $v_i \leftarrow \min \{v_i, N\}$ 
11: end while
12: Resolver la relajación lineal con la variables fijadas indicadas en  $\tilde{X}$  y  $\tilde{ZF}$ 

```

valores enteros en cada conjunto de períodos incluidos en cada ventana (Algoritmo [5.5](#)).

Por cada variable fijada indicada en el conjunto $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{fi}^n\}$ que indica la cantidad de camiones completos que se envían del centro de fabricación ubicado en la localidad indexada por f hacia el centro de distribución ubicado en la localidad indexada por i en el período n se agrega la restricción $x_{fi}^n = \tilde{x}_{fi}^n$ a la relajación lineal.

De igual forma se procede con las variables de los lotes de fabricación indicadas en el conjunto $\tilde{ZF} = \{\tilde{z}_{ff}^n\}$ agregando al modelo la restricción $z_{ff}^n = \tilde{z}_{ff}^n$.

Dado que el modelo tienen tres grupos de restricciones que limitan fuertemente la producción y distribución a saber, la capacidad de producción de un centro de fabricación (cp_f), la capacidad del almacenamiento en un centro de fabricación (cpf_f) y la capacidad de almacenamiento en un centro de distribución (cap_i), en el caso en que el intento de solución de la relajación lineal ampliada arroje como resultado que el modelo resulta no factible y se identifica que la restricción violada corresponde a la capacidad de un centro de distribución se reduce en 1 la cantidad de envíos que se deben realizar (\tilde{X}) a ese destino. En caso que la restricción violada no sea la de capacidad de un centro de distribución se reduce en 1 la cantidad de lotes que se fabrican (\tilde{ZF}) en el centro de fabricación de mayor cantidad a producir.

Prerequisitos

Relajación lineal: Modelo CD descrito en el Capítulo 4.

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución generados en el Punto 1.1.1. Van fijando sus valores en cada ciclo de ajuste a enteros de los períodos que se encuentran comprendidos en una ventana.
- $\tilde{ZF} = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados en el centro de fabricación recalculados a partir de las nuevas cantidades a despachar. Al igual que \tilde{X} se van incorporando aquellos valores que van fijando como ajustes enteros a medida que se ajustan las sucesivas ventanas.

Salida

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: El mismo conjunto de entrada \tilde{X} con algunos elementos ajustados.
- $\tilde{ZF} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: El mismo conjunto de entrada \tilde{ZF} con algunos elementos ajustados.

Se llama *relajación lineal ampliada* a la relajación lineal del Modelo CD al cual se le han agregado las restricciones que fijan los valores de las variables que han alcanzado un valor entero.

El Algoritmo 5.6 realiza una iteración hasta que se encuentre solución al modelo de la relajación lineal ampliada (línea 18) lo cual siempre sucede dado que en cada paso de la iteración se

- reduce la cantidad de envíos a realizar disminuyendo el stock en el centro de distribución y, eventualmente, incrementado la demanda insatisfecha o
- reduce la cantidad de lotes de producción a realizar si es que se viola la restricción de capacidad de almacenamiento en los centros de fabricación influyendo finalmente en el incremento de la demanda insatisfecha.

Algoritmo 5.6 Resolver la relajación lineal con la variables fijadas indicadas en \tilde{X} y \tilde{ZF}

```

1: repeat
2:   relajación lineal ampliada  $\leftarrow$  relajación lineal
3:   for  $\tilde{x}_{fi}^n \in \tilde{X}$  do
4:     incluir en la relajación lineal ampliada la restricción  $x_{fi}^n = \tilde{x}_{fi}^n$ 
5:   end for
6:   for  $\tilde{z}_{ff}^n \in \tilde{ZF}$  do
7:     incluir en la relajación lineal ampliada la restricción  $z_{ff}^n = \tilde{z}_{ff}^n$ 
8:   end for
9:   Resolver la relajación lineal ampliada
10:  if no factible then
11:    if Es generada por  $x_{fi}^n$  then
12:      Reducir el valor de  $\tilde{x}_{fi}^n \in \tilde{X}$  en 1
13:    end if
14:    if Es generada por  $z_{ff}^n$  then
15:      Reducir el valor de  $\tilde{z}_{ff}^n \in \tilde{ZF}$  en 1
16:    end if
17:  end if
18: until Se encuentra solución factible

```

2.2. Ajuste de la cantidad a enviar entre v_i y v_f . Realiza el ajuste compensado indicado en la Sección [1.1](#) solamente en los períodos que transcurren entre el período base y el período base más la amplitud de ventana v (Algoritmo [5.7](#))

Prerequisitos

- v_i : Período inicial de la ventana.
- v_f : Período final de la ventana.
- $X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1I}^1, x_{21}^1, \dots, x_{fi}^n, \dots, x_{FI}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar de un centro de fabricación a un centro de distribución tal como se definió en la Sección [3](#) del capítulo anterior.
- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras cuyos valores fueron fijados en pasos anteriores.

Salida

- Ampliación de valores en el conjunto \tilde{X} con los nuevos valores fijados. La sentencia de la línea 11 fija la variable en 0.

Algoritmo 5.7 Ajuste de la cantidad a enviar entre v_i y v_f

```

1: for cada centro de fabricación  $f \in CF$  do
2:   for cada centro de distribución  $i \in CD$  do
3:     Envios Acumulados  $\leftarrow 0$ 
4:     Envios Acumulados Enteros  $\leftarrow 0$ 
5:     for cada período  $n$  comprendido  $v_i$  y  $v_f$  do
6:       envios acumulados  $:=$  envios acumulados  $+x_{fi}^n$ 
7:       if envios acumulados  $>$  envios enteros acumulados then
8:          $\tilde{x}_{fi}^n := \lceil$  envios acumulados  $-$  envios enteros acumulados  $\rceil$ 
9:         envios enteros acumulados  $:=$  envios enteros acumulados  $+ \tilde{x}_{fi}^n$ 
10:      else
11:         $\tilde{x}_{fi}^n := 0$ 
12:      end if
13:    end for
14:  end for
15: end for

```

2.3. Ajuste de la cantidad a fabricar entre v_i y v_f . Realiza el ajuste compensado similar al indicado en la Sección [1.1](#) solamente en los períodos que transcurren entre el período base y el período base más la amplitud de ventana v

Prerequisitos

- v_i : Período inicial de la ventana.
- v_f : Período final de la ventana.
- $ZF = \{z_{f_1}^1, \dots, z_{f_1}^N, z_{f_2}^1, \dots, z_{f_f}^n, \dots, z_{f_F}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados en el centro de fabricación recalculados a partir de las nuevas cantidades a despachar. Al igual que \tilde{X} se van incorporando aquellos valores que van fijando como ajustes enteros a medida que se ajustan las sucesivas ventanas.
- $ZF = \{z_{f_1}^1, z_{f_2}^1, \dots, z_{f_f}^n, \dots, z_{f_F}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser fabricados.

Salida

- Ampliación del conjunto $\tilde{Z}F$ con los nuevos valores fijados..

Algoritmo 5.8 Ajuste de la cantidad a fabricar entre v_i y v_f

```

1: for cada centro de fabricación  $f \in CF$  do
2:    $lotes\ acumulados := 0$ 
3:    $lotes\ acumulados\ enteros := 0$ 
4:   for cada período  $n$  comprendido  $v_i$  y  $v_f$  do
5:      $lotes\ acumulados := lotes\ acumulados + z f_{fi}^n$ 
6:     if  $lotes\ acumulados > lotes\ acumulados\ enteros$  then
7:        $\tilde{z} f_f^n := \lceil lotes\ acumulados - lotes\ enteros\ acumulados \rceil$ 
8:        $lotes\ enteros\ acumulados := lotes\ enteros\ acumulados + \tilde{z} f_f^n$ 
9:     else
10:       $\tilde{z} f_f^n := 0$ 
11:    end if
12:  end for
13: end for

```

Esta heurística instrumenta el mismo procedimiento de adelantamiento de las unidades fraccionarias fijando variables y solicitando la optimización para todas aquellas variables de decisión que no fueron fijadas con la diferencia que el adelantamiento se produce solamente para un conjunto de períodos determinados por el parámetro de la heurística v .

Es de esperar un resultado de la función objetivo menor dado que el adelantamiento se produce sin observar todos los períodos que considera el modelo es decir, no trabaja con la información completa.

3. Heurística de ajuste por redondeo

Por último, se puede plantear una heurística clásica de ajuste al entero más cercano de las variables que deban ser enteras para evaluar sí, realmente se están obteniendo mejoras con las heurísticas anteriores que contemplan en cierta manera, características propias de problema que se busca resolver. Por ello se plantea una heurística que a partir de la relajación lineal del problema se ajusten aquellos valores que deben ser enteros mediante un redondeo, pero los resultados pueden

- generar un conjunto de valores que se escapa del espacio de soluciones, o
- un sub-óptimo del problema,

lo cual nos lleva a pensar una heurística que comience fijando algunos valores de las variables que se encuentren cercanos a un valor entero volviendo a realizar la optimización para establecer los valores para aquellas variables no fijadas.

Se instrumenta una heurística que parte de la solución de la relajación lineal del modelo CD y aplica un ajuste por redondeo reiteradamente sobre las variables del envío de camiones desde los centros de fabricación a los centros de distribución (X).

El ajuste se realiza tomando un valor ϵ llamado “límite de redondeo” para determinar la amplitud fraccionaria del ajuste a realizar. Si la parte fraccionaria de la variable no entera es menor e igual a ϵ ajusta al entero inferior. En cambio, si la parte fraccionaria es superior a $1 - \epsilon$ ajusta al entero superior. Luego de fijar los valores se realiza nuevamente la optimización de la relajación lineal del modelo CD y se vuelve a ajustar.

En caso que no se pueda ajustar valor alguno, se incrementa ϵ en un δ , llamado “ajuste al límite de redondeo” tantas veces como sea necesario para que realice uno o más ajustes y, nuevamente se optimiza la relajación lineal del modelo CD (Algoritmo 5.9).

Prerequisitos

- ϵ : Valor a partir del cual se decidirá ajustar la cantidad de camiones enviados desde un centro de fabricación a un centro de distribución en un período dado (X) hacia el máximo entero inferior o hacia el mínimo entero superior.
- δ : Valor en el cual se incrementará ϵ cuando no encuentra ningún elemento para ajustar.
- N : Cantidad de períodos comprendidos en la optimización.
- $X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1I}^1, x_{21}^1, \dots, x_{fi}^n, \dots, x_{FI}^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar de un centro de fabricación a un centro de distribución tal como se definió en la sección 3 del Capítulo 3.

- $ZF = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados como se ha definido en el modelo CD del Capítulo 3

Se presupone que la relajación lineal del modelo CD tiene solución óptima factible.

Salida

- $\tilde{X} = \{\tilde{x}_{11}^1, \tilde{x}_{12}^1, \dots, \tilde{x}_{1I}^1, \tilde{x}_{21}^1, \dots, \tilde{x}_{fi}^n, \dots, \tilde{x}_{FI}^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de camiones completos que se deben enviar desde los centros de fabricación a los centros de distribución generados en el Punto 1.1.1
- $\tilde{ZF} = \{zf_1^1, \dots, zf_1^N, zf_2^1, \dots, zf_f^n, \dots, zf_F^N\}$: Conjunto de variables enteras de decisión no negativas que indican la cantidad de lotes de producto que deben ser terminados en el centro de fabricación recalculados a partir de las nuevas cantidades a despachar.

Algoritmo 5.9 Ajuste por redondeo

```

1:  $\tilde{X} \leftarrow \emptyset$ 
2:  $\tilde{ZF} \leftarrow \emptyset$ 
3: while algún elemento de  $X$  no sea entero do
4:   Ajustar la cantidad a enviar con  $\epsilon$  y  $\delta$  ampliando  $\tilde{X}$ 
5:   if no se ha ampliado  $\tilde{X}$  then
6:     Break
7:   end if
8:   Resolver la relajación lineal con las variables fijadas indicadas en  $\tilde{X}$  y  $\tilde{ZF}$ 
9:   Ajustar la cantidad de lotes a fabricar con  $\epsilon$  y  $\delta$  ampliando  $\tilde{ZF}$ 
10:  if no se ha ampliado  $\tilde{ZF}$  then
11:    Break
12:  end if
13:  Resolver la relajación lineal con las variables fijadas indicadas en  $\tilde{X}$  y  $\tilde{ZF}$ 
14: end while

```

Como se puede ver en el Algoritmo 5.9, en cada iteración se realizan dos optimizaciones de la relajación lineal, la primera luego de ajustar las cantidades a enviar de los centros de fabricación a los centros de distribución y la segunda luego de ajustar los lotes de fabricación, eso se debe a encontrar la mejor cantidad de lotes a fabricar luego de haber fijado la cantidad de envíos a los centros de distribución.

3.1. Ajuste de la cantidad a enviar con ϵ y δ . Realiza el ajuste de la cantidad a enviar x_{fi}^n al entero más cercano para aquellos valores en los cuales la parte fraccionaria es inferior a ϵ o superior a $1 - \epsilon$. Si no se realiza ningún ajuste luego de revisar todos los elementos de X , se repite la operación para todos los valores de $r \in \mathbb{N}$ que cumplen $\epsilon + r \delta < 0,5$ (Algoritmo [5.10](#)). Estas subsecuentes revisiones son necesaria para ajustar aquellas partes fraccionarias que son levemente superiores a ϵ o levemente inferiores a $1 - \epsilon$.

Prerequisitos

- ϵ : Valor a partir del cual se decidirá ajustar la cantidad de camiones enviados desde un centro de fabricación a un centro de distribución en un período dado (X) hacia el máximo entero inferior o hacia el mínimo entero superior.
- δ : Valor en el cual se incrementará ϵ cuando no encuentra ningún elemento para ajustar.
- Las variables X y \tilde{X} mencionadas en la sección anterior.

Se denota como $frac(x_{fi}^n)$ al valor de la parte fraccionaria de x_{fi}^n , es decir que $x_{fi}^n = \lfloor x_{fi}^n \rfloor + frac(x_{fi}^n)$.

3.2. Ajuste de la cantidad de lotes a fabricar con ϵ y δ . El mismo tipo de ajuste descrito en la sección anterior se realiza para la cantidad de lotes a fabricar en cada centro de fabricación $z f_j^n$ ajustándolo al entero más cercano para aquellos valores en los cuales la parte fraccionaria es inferior a ϵ o superior a $1 - \epsilon$ (Algoritmo [5.11](#)).

Si no se realiza ningún ajuste luego de revisar todos los elementos de ZF , se repite la operación para todos los valores de $r \in \mathbb{N}$ que cumplen $\epsilon + r \delta < 0,5$.

Prerequisitos

- ϵ : Valor a partir del cual se decidirá ajustar la cantidad de lotes a fabricar ZF hacia el máximo entero inferior o hacia el mínimo entero superior.

Algoritmo 5.10 *Ajuste de la cantidad a enviar con ϵ y δ*

```

1:  $Corte \leftarrow \epsilon$ 
2: while no se ha ampliado  $\tilde{X}$  do
3:   for cada  $x_{fi}^n \in X$  do
4:     if  $x_{fi}^n \notin \mathbb{Z}$  then
5:       if  $frac(x_{fi}^n) < Corte$  then
6:         Incluir en  $\tilde{X}$  la tupla  $(f, i, n, \lfloor x_{fi}^n \rfloor)$ 
7:       else
8:         if  $frac(x_{fi}^n) > 1 - Corte$  then
9:           Incluir en  $\tilde{X}$  la tupla  $(f, i, n, \lceil x_{fi}^n \rceil)$ 
10:        end if
11:      end if
12:    end for
13:  end for
14:  if no se ha ampliado  $\tilde{X}$  then
15:     $Corte \leftarrow Corte + \delta$ 
16:  end if
17:  if  $Corte > 0,5$  then
18:    Break
19:  end if
20: end while

```

- δ : Valor en el cual se incrementará ϵ cuando no encuentra ningún elemento para ajustar.
- Las variables ZF y $\tilde{Z}F$ como han sido definidas en las secciones anteriores.
- La variable $\tilde{Z}F = \{z_{f_1}^1, z_{f_2}^1, \dots, z_{f_f}^n, \dots, z_{f_F}^N\}$ se amplía sobre la base de los ajustes realizados.

De la misma forma que fue determinado en la sección anterior, se denota como $frac(zf_f^n)$ al valor de la parte decimal de zf_f^n es decir que $zf_f^n = \lfloor zf_f^n \rfloor + frac(zf_f^n)$.

Esta última heurística no incorpora ninguna de las características propias del problema a resolver, por lo tanto, es de esperar que se comporte de forma menos eficaz. Además, hay casos en que el ajuste realizado puede degenerar en soluciones no factibles.

Supongamos el problema lineal entero expresado en (75) con solución $x_1 = 1$ y $x_2 = 1$. Si resolvemos la relajación lineal el resultado óptimo sería $x_1 = 1.7$ y $x_2 = 0.4$, al ejecutar con estos valores la heurística fijando el parámetro ϵ en el valor

Algoritmo 5.11 *Ajuste de la cantidad de lotes a fabricar con ϵ y δ*

```

1:  $Corte \leftarrow \epsilon$ 
2: while no se ha ampliado  $\tilde{ZF}$  do
3:   for cada  $zf_f^n \in ZF$  do
4:     if  $zf_f^n \notin \mathbb{Z}$  then
5:       if  $frac(zf_f^n) < Corte$  then
6:         incluir en  $\tilde{ZF}$  la tupla  $(f, n, \lfloor zf_f^n \rfloor)$ 
7:       else
8:         if  $frac(zf_f^n) > 1 - Corte$  then
9:           incluir en  $\tilde{ZF}$  la tupla  $(f, n, \lceil zf_f^n \rceil)$ 
10:        end if
11:      end if
12:    end for
13:  end for
14:  if no se ha ampliado  $\tilde{ZF}$  then
15:     $Corte \leftarrow Corte + \delta$ 
16:  end if
17:  if  $Corte > 0,5$  then
18:    Break
19:  end if
20: end while

```

0.5 las variables de decisión quedarían fijadas en $x_1 = 2$ y $x_2 = 0$ restricciones que transformarían el problema en uno que no tenga solución factible.

$$\begin{array}{ll}
 (75) & \text{máx } x_1 + x_2 \\
 & \text{sujeto a } x_1 + x_2 \leq 2.1 \\
 & x_1, x_2 \geq 0.4
 \end{array}$$

Para valorar el funcionamiento de las heurísticas descritas en relación con la solución encontrada mediante CPLEX se realizara una serie de experimentos en el próximo capítulo.

Experimentación computacional

En el Capítulo 5 se han descrito tres heurísticas para encontrar una solución aproximada al Modelo de distribución / fabricación multiperíodo con la demanda concentrada en los centros de distribución presentado en el Capítulo 4 (modelo CD).

Con la finalidad de evaluar si las heurísticas propuestas presentan una mejora en la solución aproximada del modelo, ya sea en tiempo de ejecución y/o en la calidad de la solución se realizan diversos experimentos variando instancias y parámetros. Se muestran y comparan los resultados entre las diferentes heurísticas y contra los entregados por CPLEX.

Se podrá ver que la heurística de dos fases presenta mejoras importantes en el tiempo de ejecución requerido para alcanzar una solución de calidad cercana o superior a la lograda por CPLEX en un tiempo fijo.

Por otra parte, la heurística de ajuste compensado con avance temporal ofrece una performance interesante pero con menor calidad en la solución. Se verá si el tamaño de la ventana produce un efecto apreciable en la misma.

Por último la heurística de ajuste por redondeo será la que presenta peor calidad en sus soluciones, e incluso, en muchas ocasiones no llega a encontrar una solución factible.

1. Características de la implementación

Se ha utilizado una computadora con procesador Intel *I7* de 2.4 GHz con 16 GB de memoria RAM y sistema operativo de 64 bits. Las heurísticas han sido

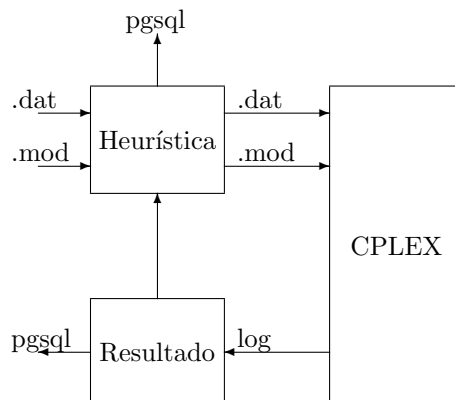


FIGURA (6.1). Arquitectura de la implementación.

implementadas en Python 3.4 y se ha utilizado IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.5.1.0.

Tanto los escenarios generados como los resultados de los experimentos realizados se han almacenado en una base de datos PostgreSQL versión 12 alojada en el equipo de los experimentos.

La base de datos tiene un tamaño de 4.8 Gb conteniendo 24 tablas entre las que se encuentra la que almacena los resultados de los experimentos con más de 35 millones de filas.

Cada modelo se ha implementado en sintaxis OPL en un archivo .mod que lee los datos desde un archivo .dat. Las diferentes heurísticas ajustan los archivos .mod y .dat mediante un proceso previo a la ejecución CPLEX para obtener el resultado de la optimización.

En el Cuadro [6.1](#) se ven los módulos que interactúan con CPLEX enviándole el modelo y los datos de la instancia a resolver. Luego de su ejecución envía el log generado para su interpretación.

El módulo “Heurística” se responsabiliza de instrumentar las heurísticas que ajustan los resultados obtenidos por CPLEX completando los datos de la instancia

y/o restricciones del modelo fijando los valores de las variables correspondiente. Para eso realiza un preprocesamiento incorporando los valores de cada escenario a utilizar en la experimentación en el archivo .dat y, en aquellos casos en que se fija el valor de una variable incorpora la restricción en el archivo .mod.

El preprocesamiento del archivo .dat reconoce parámetros de sustitución que son reemplazados por los valores determinados por la instancia a realizar y la heurística a testear. Estos son:

- **{NPeríodos}**: Cantidad de períodos a considerar,
- **{NEscenarios}**: Cantidad de escenarios a considerar,
- **{ValoresEscenarios}**: Valores que se asignan a las demandas,
- **{ProbabilidadEscenarios}**: Probabilidad de ocurrencia de cada uno de los escenarios.

Ahora bien, en el caso del preprocesamiento del archivo .mod reconoce el lugar para la posible inserción de las restricciones que fijan las variables con la etiqueta **@Pre_Asignacion: %**.

El módulo “Resultado” se encarga de interpretar el log generado por CPLEX para incorporar los valores de las variables de decisión determinados durante la optimización.

El código del Apéndice **G** realiza impresiones en el log de CPLEX con la siguiente estructura:

- nombre de variable,
- centro de fabricación,
- centro de distribución,
- centro de consumo o punto de venta,
- número de período,
- número de escenario,
- valor de la variable alcanzado durante la simulación.

Además, este módulo “Resultado” identifica esta estructura para conformar la sentencia SQL que solicitará la incorporación de esos valores en la base de datos PostgreSQL. De igual manera, inspecciona el log buscando palabras clave que identifican el estado de terminación de la optimización como ser

- óptimo
- restricciones violadas,
- iteraciones realizadas,
- gap alcanzado,
- etc.

2. Variantes de las instancias

A partir de los escenarios de demanda estimados mediante el procedimiento descrito en el Capítulo 2 se calcula la demanda que se asocia al centro de distribución que se encuentra más cerca de la localidad para la cual se estimó la demanda (ver Sección 1 del Capítulo 4). Se han realizado experimentos con diversas instancias que se diferencian en:

- cantidad de escenarios a considerar,
- diferentes cantidades de centros de distribución (6, 8, y 10),
- regiones geográficas cuya demanda se busca satisfacer.

Se utiliza un centro de fabricación con capacidad de almacenamiento levemente inferior a la capacidad de almacenamiento de los centros de distribución aunque a un costo superior.

Las penalidades por demanda insatisfecha duplican a las de exceso de stock y el costo de transporte fue estimado en forma proporcional al precio del gasoil y la distancia entre los distintos puntos tomados de las coordenadas geográficas de los centros de cada localidad obtenidas de Google Maps (Apéndice K).

Los precios de venta varían entre los diferentes centros de distribución y son sensiblemente superiores a los costos de fabricación. El tiempo se distribuyó en 48 semanas.

CUADRO (6.1). Localidades en la cuales se ubican los centros de distribución.

Provincia	Localidad	Cantidad CD's		
		6	8	10
Buenos Aires	Carlos Casares	×	×	×
	Saladillo	×	×	×
	Necochea			×
Cordoba	Rio Cuarto	×	×	×
Entre Ríos	Gualeguachú			×
	Paraná	×	×	×
Santa Fe	General Obligado		×	×
La Pampa	Realicó	×	×	×
Sgo. del Estero	La Banda	×	×	×
Tucumán	Burruyacú		×	×

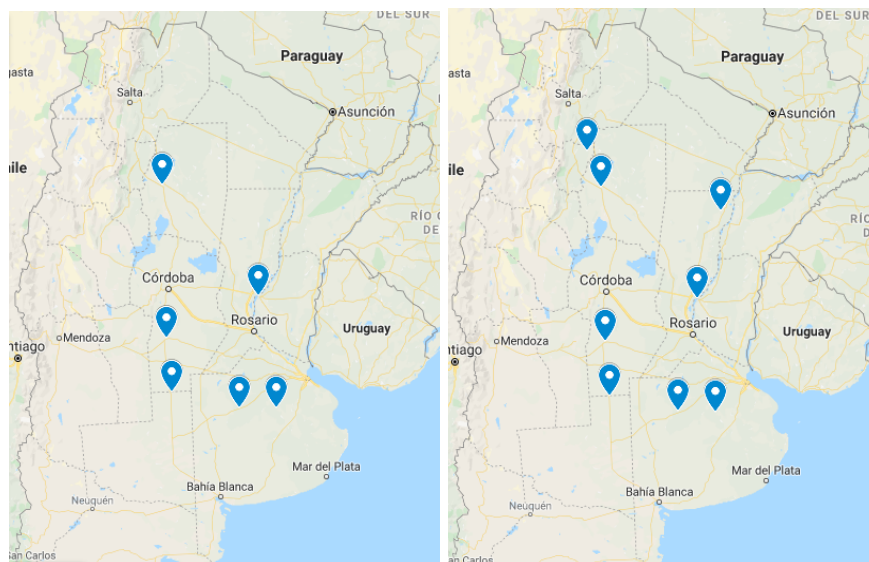
En cada experimento se fue ampliando progresivamente la cantidad de escenarios que se tienen en consideración, comenzando con 10 escenarios hasta alcanzar los 160 escenarios creciendo a intervalos de 10 escenarios.

Según la cantidad de centros de distribución se han tomado como alternativas 6, 8, y 10 centros de distribución distribuidos a lo largo de la República Argentina (Figura 6.2). Por ejemplo, cuando se utilizan 6 centros de distribución, éstos se ubican en Carlos Casares, Saladillo, Rio Cuarto, Paraná, Realicó y La Banda, para 8 centros se agrega General Obligado y Burruyacú.

En todas las instancias, el centro de fabricación se ha localizado dentro del Área Metropolitana Rosario en la provincia de Santa Fe.

Así mismo, se crearon instancias (segmentando por provincia, ver Figura 6.3) que difieren en las localidades de los centros de consumo que se desea cubrir, considerando solamente la demanda de un conjunto de localidades. Se plantean cuatro variantes (Figura 6.3):

- se cubre la demanda de todas las localidades de los centros de consumo de la Argentina (Figura 6.3a), que llamaremos *instancia completa*,



(A) Instancia: 6 CD

(B) Instancia: 8 CD



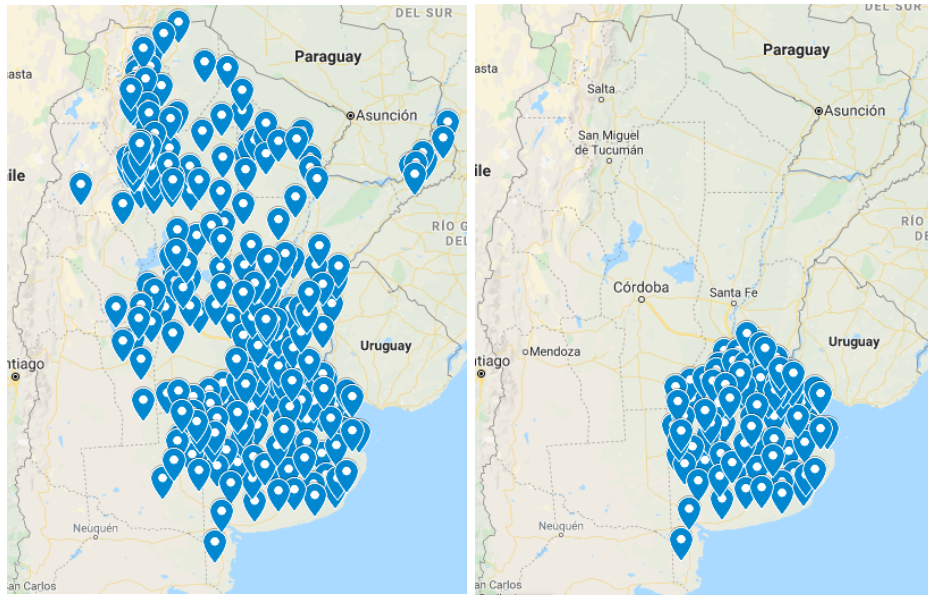
(C) Instancia: 10 CD

FIGURA (6.2). Localidades donde se encuentran los centros de distribución en las diferentes instancias.

- se cubre solamente la demanda de las localidades de la Provincia de Buenos Aires, representa el 32% de la producción total (Figura 6.3b), que llamaremos *instancia Bs. As.*,

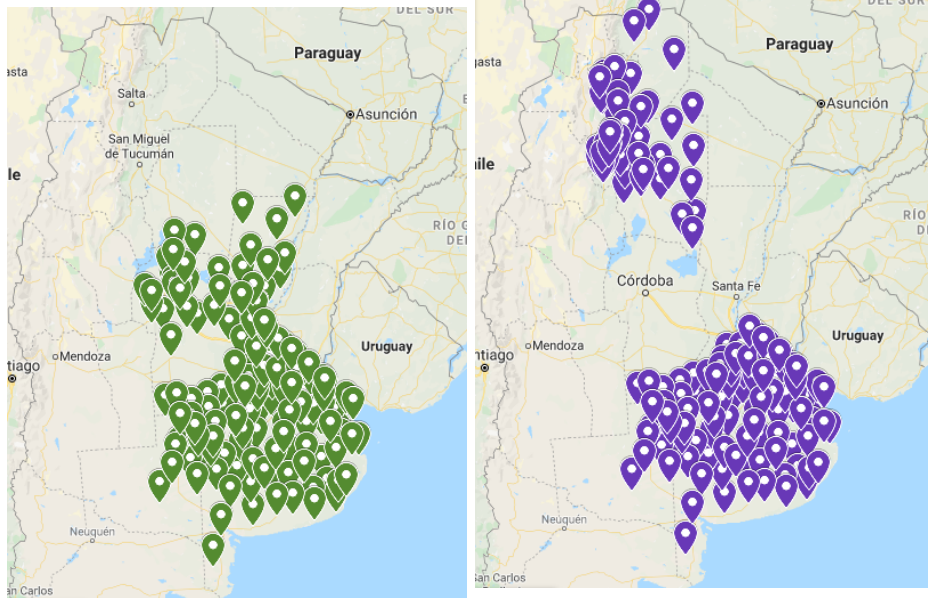
- se cubre la demanda de las localidades de las Provincias de Buenos Aires, La Pampa, Córdoba, y Santa Fe, las cuales acumulan el 81 % de la producción total (Figura 6.3c), que llamaremos *instancia centro*,
- se cubre la demanda de las localidades de las Provincias de Buenos Aires, La Pampa, Tucumán, Salta y Santiago del Estero, que acumulan el 42 % de la producción total con la particularidad que se concentran en dos zonas separadas (Figura 6.3d), que llamaremos *instancia partida*.

En el Cuadro J.2 del Apéndice J se puede ver la incidencia de cada una de las provincias en la producción total del cultivo.



(A) Instancia Completa

(B) Instancia Bs. As.



(c) Buenos Aires, La Pampa, Córdoba y Santa Fe. (Instancia Centro)

(D) Buenos Aires, La Pampa, Tucumán, Salta y Santiago del Estero. (Instancia Partida)

FIGURA (6.3). Cobertura de las localidades donde se encuentran los centros de consumo en las diferentes instancias.

3. Efecto de la relajación lineal

En esta sección se presenta la diferencia entre la solución de la relajación lineal y la aproximación a la solución del modelo entero encontrada por CPLEX con un tiempo máximo de proceso de 20 minutos.

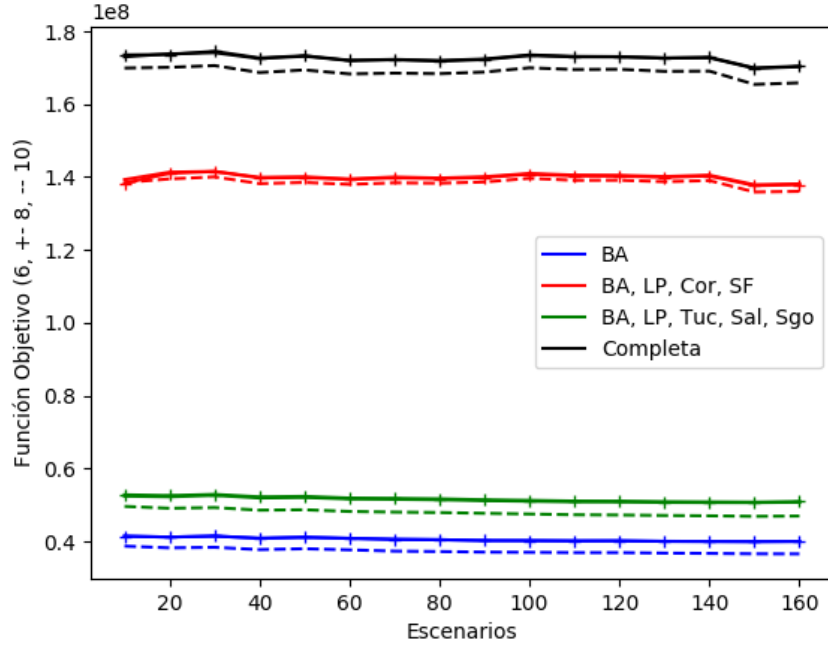
En la Figura 6.4 se puede observar el valor de la función objetivo para la relajación lineal (Figura 6.4a) y para el modelo entero con un tiempo de ejecución máximo de 20 minutos (Figura 6.4b) en las instancias segmentadas por provincia (Figura 6.3) y por las tres configuraciones de centros de distribución (Figura 6.2), en función de la cantidad de escenarios considerados.

Los valores de la función objetivo cuando se utilizan 6 centros de distribución se representan mediante una línea continua, para los 8 centros se utiliza una línea cruzada y para los 10 centros de distribución se utiliza una línea de cruces.

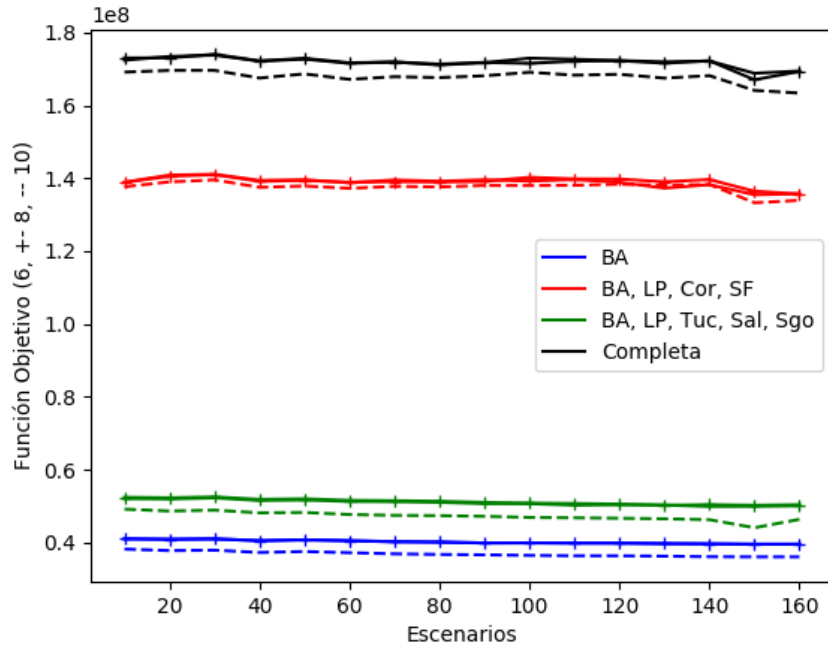
Se ve que los resultados obtenidos para 6 y 8 centros no presentan diferencias visuales dado que las líneas se superponen levemente, en cambio la configuración de mayor cantidad de centros (10) tiene peor performance, en todos los casos.

Si observamos la pendiente de la recta lineal que mejor ajusta a los valores estandarizados de la función objetivo se ve que es de signo negativo (ver en los Cuadros 6.2 y 6.3 la pendiente de la recta formada por los valores estandarizados de la función objetivo), lo cual indicaría que a medida que se incrementa la cantidad de escenarios disminuiría levemente el valor del beneficio del negocio dado que busca la mejor solución que satisfaga a mayor cantidad de escenarios.

En la Figura 6.5 se puede ver qué, en la mayor cantidad de instancias el gap a los 20' de tiempo de ejecución es inferior al 1% en tanto que la instancia que corresponde a la zona partida (Bs. As, La Pampa, Tucumán, Salta y Santiago del Estero) con 150 escenarios y 10 centros de distribución supera el 2%.



(A) Valor óptimo de la Relajación lineal.



(B) Valor óptimo del modelo entero con un límite de tiempo de 20'.

FIGURA (6.4). Función objetivo de la solución de la relajación lineal vs solución aproximada del modelo entero.

CUADRO (6.2). Pendiente del valor de la función objetivo estandarizada para la relajación lineal

centros de distribución	Completo	Buenos Aires	Bs. As. La Pampa Córdoba Santa Fe (Centro)	Bs. As. La Pampa Tucumán Salta Sgo del Estero (Partida)
6	-0,01291	-0,01997	-0,00896	-0,02011
8	-0,01329	-0,01997	-0,00704	-0,02032
10	-0,01287	-0,02020	-0,02048	-0,00995

CUADRO (6.3). Pendiente del valor de la función objetivo estandarizada para el modelo entero con límite a los 20 minutos

centros de distribución	Completo	Buenos Aires	Bs. As. La Pampa Córdoba Santa Fe (Centro)	Bs. As. La Pampa Tucumán Salta Sgo del Estero (Partida)
6	-0,01336	-0,02035	-0,01613	-0,02040
8	-0,01473	-0,02032	-0,01159	-0,02045
10	-0,01390	-0,02034	-0,01176	-0,01912

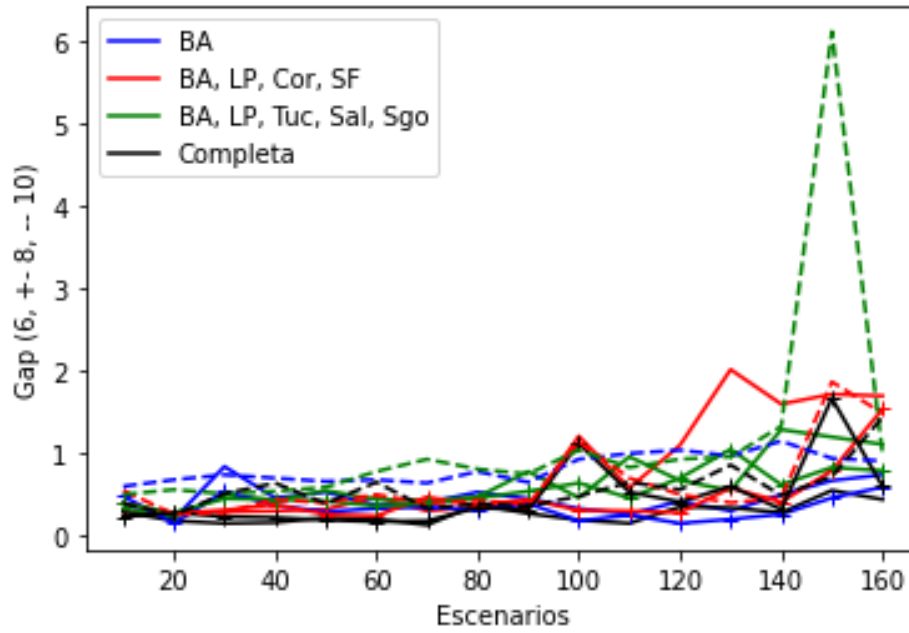


FIGURA (6.5). Gap de la solución del modelo entero con 20' de límite en el tiempo de ejecución.

4. Heurística de dos fases

Como se detalló en la Sección 1 del Capítulo 5, esta heurística parte de la solución de la relajación lineal, a la cual se le realizan ajustes en dos etapas

- Fase 1: Ajuste compensado de envíos.
- Fase 2: Búsqueda de mejoras guiada por penalidad.

El *Ajuste compensado de envíos* actúa sobre las variables de los envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución (X) ajustando los mismos hacia atrás en el tiempo. Con posterioridad reelabora los valores de la cantidad de lotes de fabricación realizados (ZF).

La *Búsqueda de mejoras guiada por penalidad* trata de lograr un mayor valor de la función objetivo realizando ajustes en las envíos a realizar desde los centros de fabricación hacia los centros de distribución (X) guiados por el valor de las penalidades por demanda insatisfecha (incrementando el envío) y por excedente de stock (disminuyendo el envío) que participan en la evaluación de la función objetivo. Con posterioridad reelabora los valores de la cantidad de lotes de fabricación realizados (ZF).

En la Figura 6.6 se puede observar el valor de la función objetivo para la instancia completa expresada como la proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal. Se grafica la proporción para el modelo entero limitado a 20 minutos de tiempo de ejecución de CPLEX junto con la proporción del valor de la función objetivo alcanzado luego de la primer fase de la heurística de dos fases y la proporción del valor alcanzado por ella al final de la segunda fase en función de la cantidad de escenarios en tres cuadros, cada uno de ellos corresponde a la instancia con 6, 8 y 10 centros de distribución.

Se aprecia que para una proporción importante de las instancias ejecutadas, el valor de la función objetivo alcanzado al final de la segunda fase supera la solución factible hallada por CPLEX. En aquellos casos en que no la supera, su valor se encuentra cercano a la misma (observar que el eje de las ordenadas se encuentra graduado entre 0.98 y 1).

En una pequeña cantidad de casos la segunda fase no ha logrado mejoras respecto del valor alcanzado durante la primera fase.

Un comportamiento similar se observa en la Figura 6.7 con la instancia en la cual la demanda satisfecha es solamente aquella que se produce en la provincia de Buenos Aires (se recuerda que representa el 32% de la demanda - ver Cuadro J.2 del Anexo J).

Se aprecia que el valor hallado por CPLEX supera al valor obtenido en ambas fases de la heurística en casi todas las instancias para el caso de 6 y 8 centros de distribución, no siendo así para las instancias con 10 centros de distribución, en la que la solución de la fase 2 supera en varios casos la encontrada por CPLEX. No obstante, en todos los casos los resultados al terminar la fase 2 se encuentra una diferencia menor al 1% del resultado arrojado por CPLEX. Observar que el eje de las ordenadas se encuentra graduado entre 0.96 y 1.

En todos las instancias probadas, a excepción de dos de ellas, el valor alcanzado en la fase 2 representa una mejora respecto al valor logrado en la fase 1.

Un comportamiento similar se observa con la instancia centro en la Figura 6.8 (la zona representa el 81% de la demanda - ver Cuadro J.2 del Anexo J). Se observa que el valor de la función objetivo al final de la segunda fase supera el valor de la función objetivo de la solución del modelo entero con un máximo de 20 minutos de tiempo de ejecución en todas las instancias a excepción de tres casos. Observar que el eje de las ordenadas se encuentra graduado entre 0.975 y 1.

Un comportamiento similar se observa en la Figura 6.9 con la instancia partida en la cual la demanda satisfecha se encuentra distribuida en dos zonas disjuntas que cubren el 42% de la demanda (ver Cuadro J.2 del Anexo J). Se puede ver que, en aproximadamente, la mitad de las instancias el valor de la función objetivo al final de la segunda fase supera al valor de la función objetivo del modelo lineal con un máximo de 20 minutos de tiempo de ejecución. Observar que el eje de las ordenadas se encuentra graduado entre 0.935 y 1.

Cambiando el punto de vista de los datos y agrupando los resultados por la cantidad de centros de distribución, en las Figuras 6.10, 6.11 y 6.12 se puede ver el

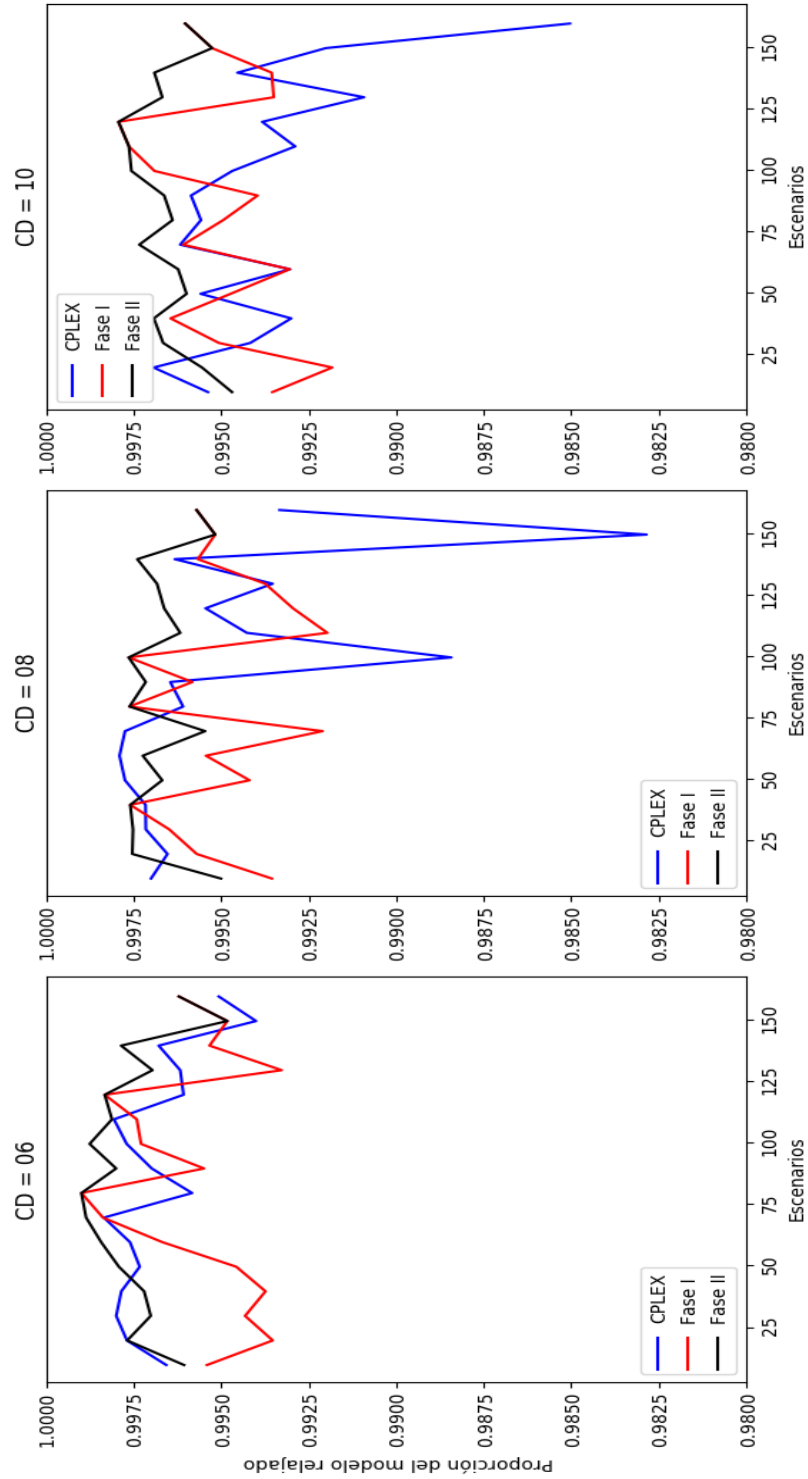


FIGURA (6.6). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia completa.

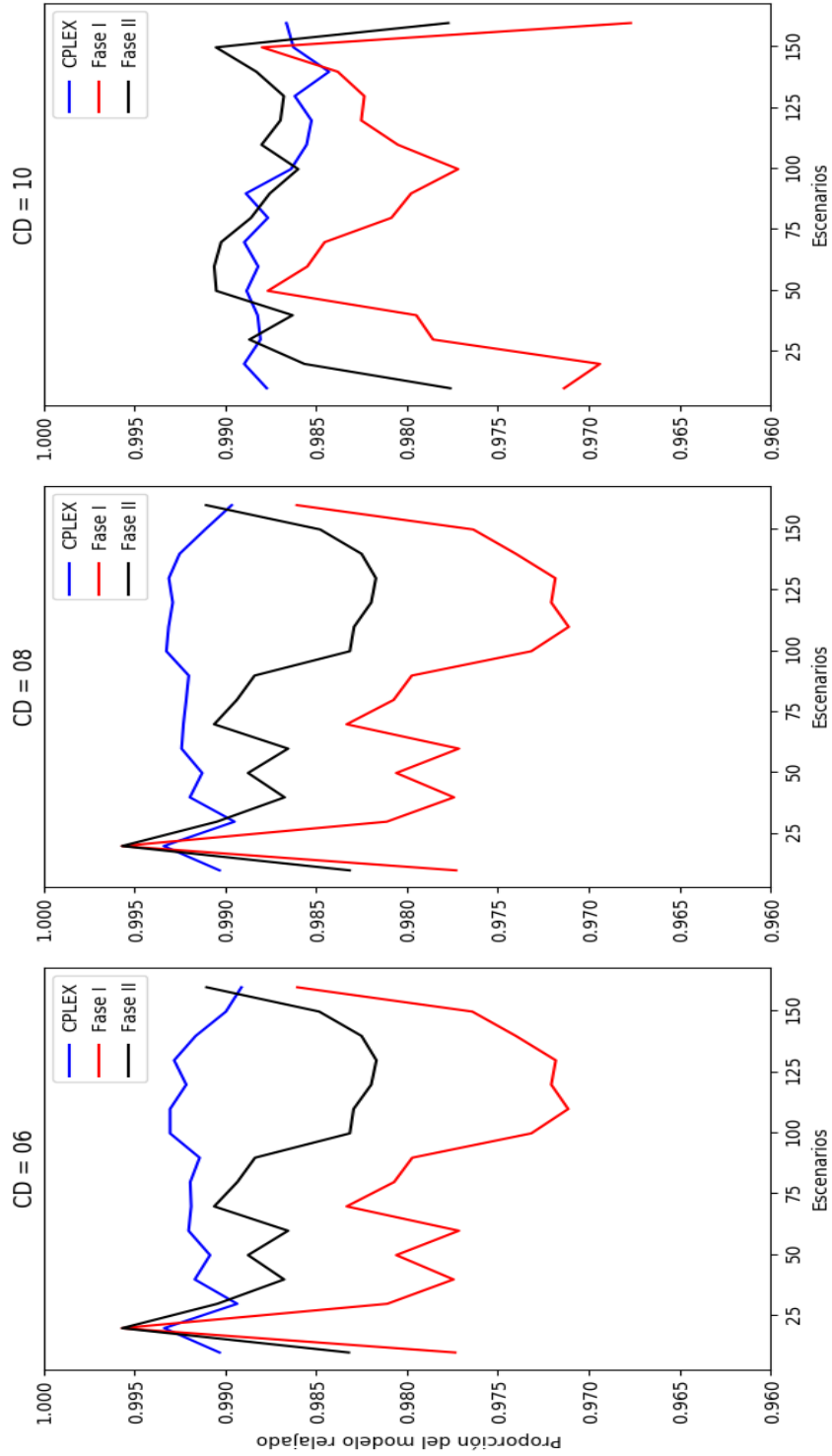


FIGURA (6.7). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia Buenos Aires.

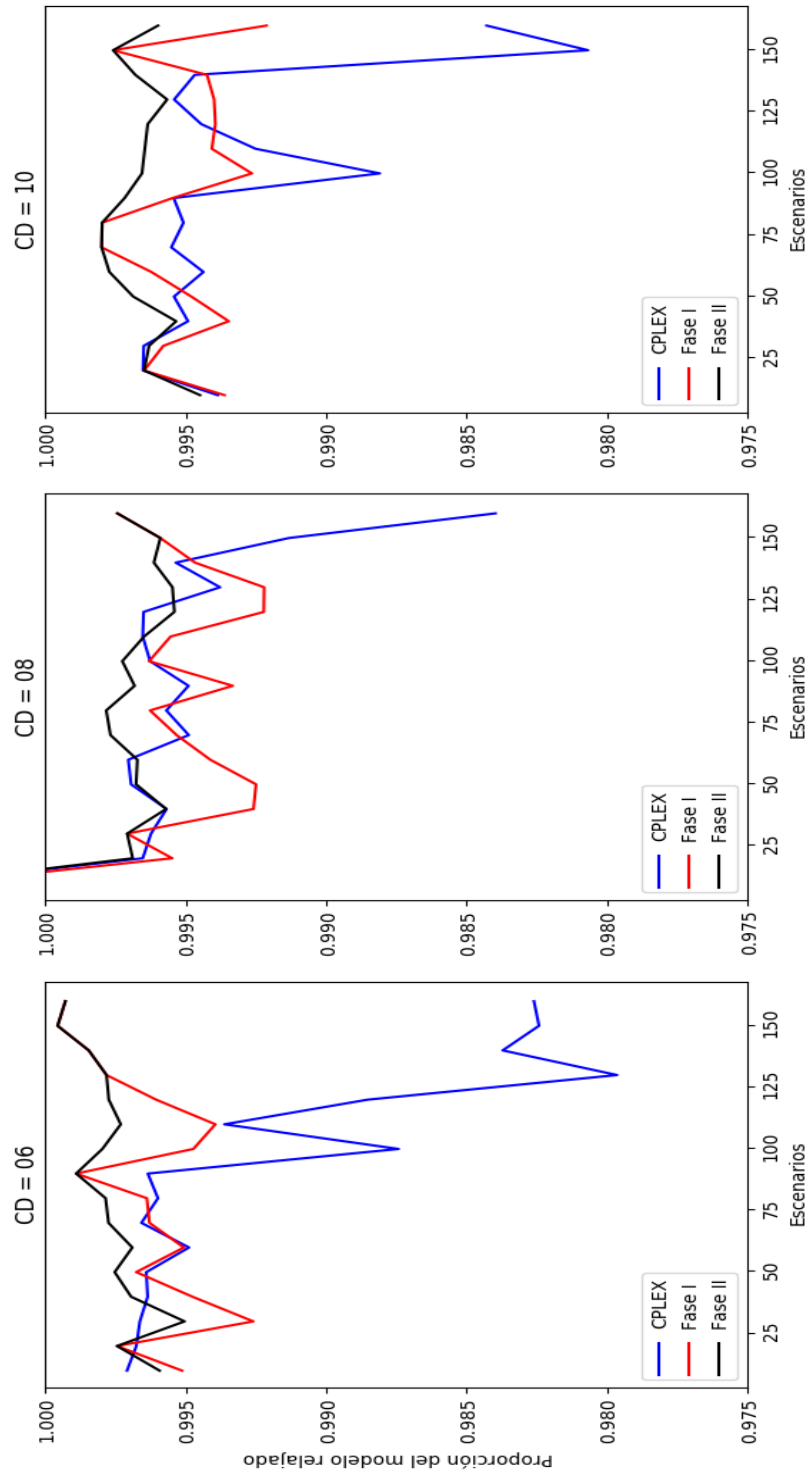


FIGURA (6.8). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia centro.

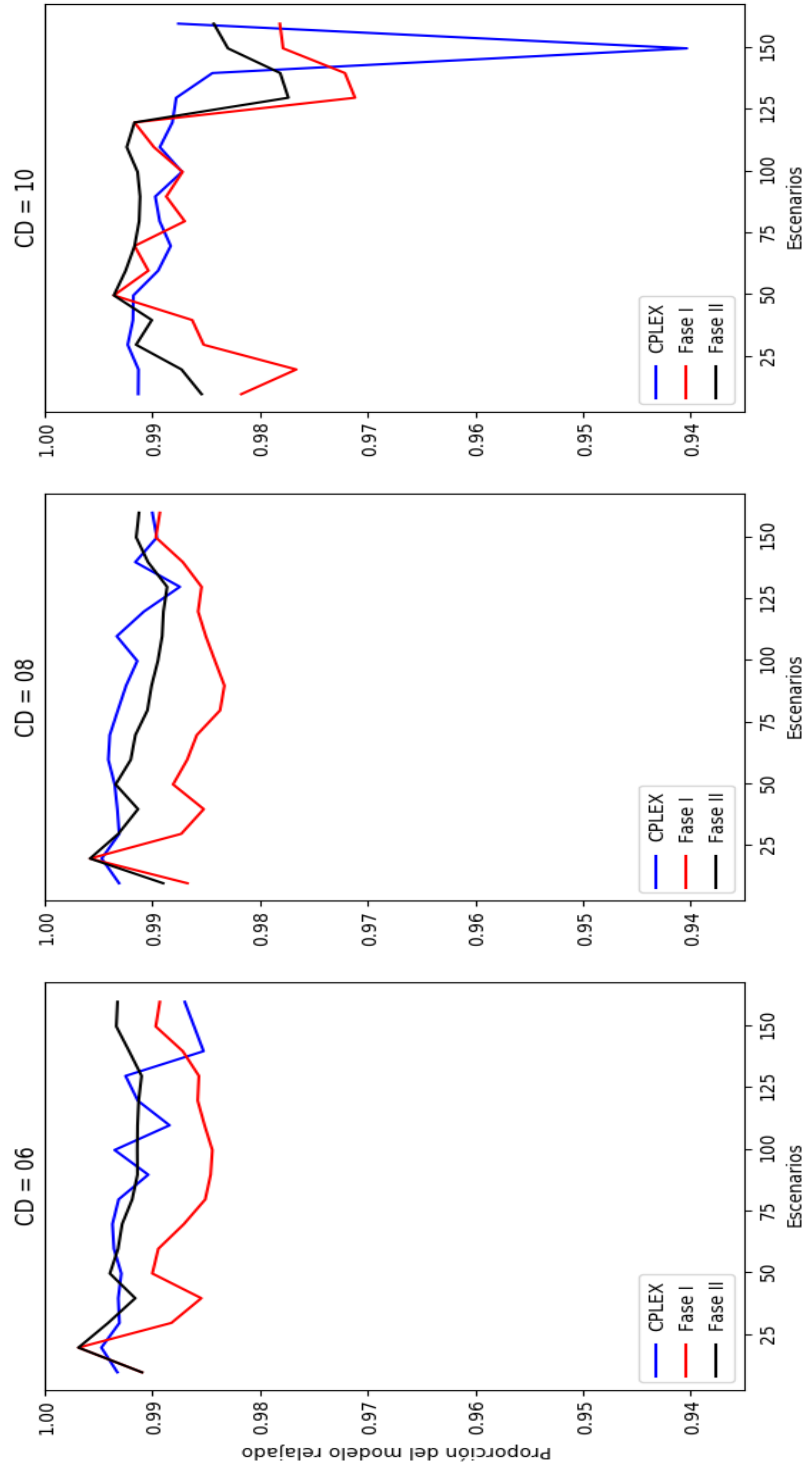


FIGURA (6.9). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia partida.

CUADRO (6.4). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia completa con 6 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	172.99	172.40	0.28	0.9966	172.20	172.31	0.9961
20	173.82	173.42	0.17	0.9977	172.69	173.41	0.9977
30	174.13	173.78	0.14	0.9980	173.14	173.61	0.9970
40	172.52	172.14	0.15	0.9979	171.43	172.03	0.9972
50	173.16	172.70	0.21	0.9973	172.22	172.80	0.9979
60	171.96	171.55	0.19	0.9976	171.39	171.69	0.9984
70	172.20	171.92	0.12	0.9983	171.92	172.00	0.9989
80	171.81	171.09	0.37	0.9958	171.64	171.64	0.9990
90	172.25	171.73	0.26	0.9970	171.47	171.90	0.9980
100	173.35	172.95	0.18	0.9977	172.88	173.13	0.9988
110	172.98	172.65	0.14	0.9981	172.54	172.66	0.9981
120	172.97	172.29	0.34	0.9961	172.68	172.68	0.9983
130	172.61	171.95	0.33	0.9962	171.45	172.09	0.9970
140	172.72	172.16	0.27	0.9968	171.91	172.35	0.9979
150	169.83	168.81	0.54	0.9940	168.95	168.95	0.9948
160	170.27	169.43	0.43	0.9951	169.62	169.62	0.9962

valor de la misma métrica (valor de la función objetivo para la instancia expresada como la proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal) en función de la cantidad de escenarios para las instancias de 6, 8 y 10 centros de distribución.

En los Cuadros [6.4](#) - [6.7](#) se pueden ver para los 4 grupos de instancias completa, Bs. As., centro y partida respectivamente colocando 6 centros de distribución los valores de la función objetivo expresada en millones de pesos para la relajación lineal, para el modelo entero resuelto por CPLEX con el tiempo límite de 20 minutos junto con la brecha (gap) al cabo de ese tiempo de ejecución además, los valores para la primera, segunda fase de la heurística de dos fases y la proporción de la función objetivo de la relajación lineal que representa el valor alcanzado con la segunda fase.

Los Cuadros [6.8](#) - [6.11](#) y [6.12](#) - [6.15](#) contienen los valores descriptos en el párrafo anterior para las instancias con 8 y 10 centros de distribución, respectivamente.

Como se ha mencionado en la Sección [1.2](#) del Capítulo [5](#), la heurística de dos fases tiene en su segunda fase un parámetro que indica la cantidad máxima de

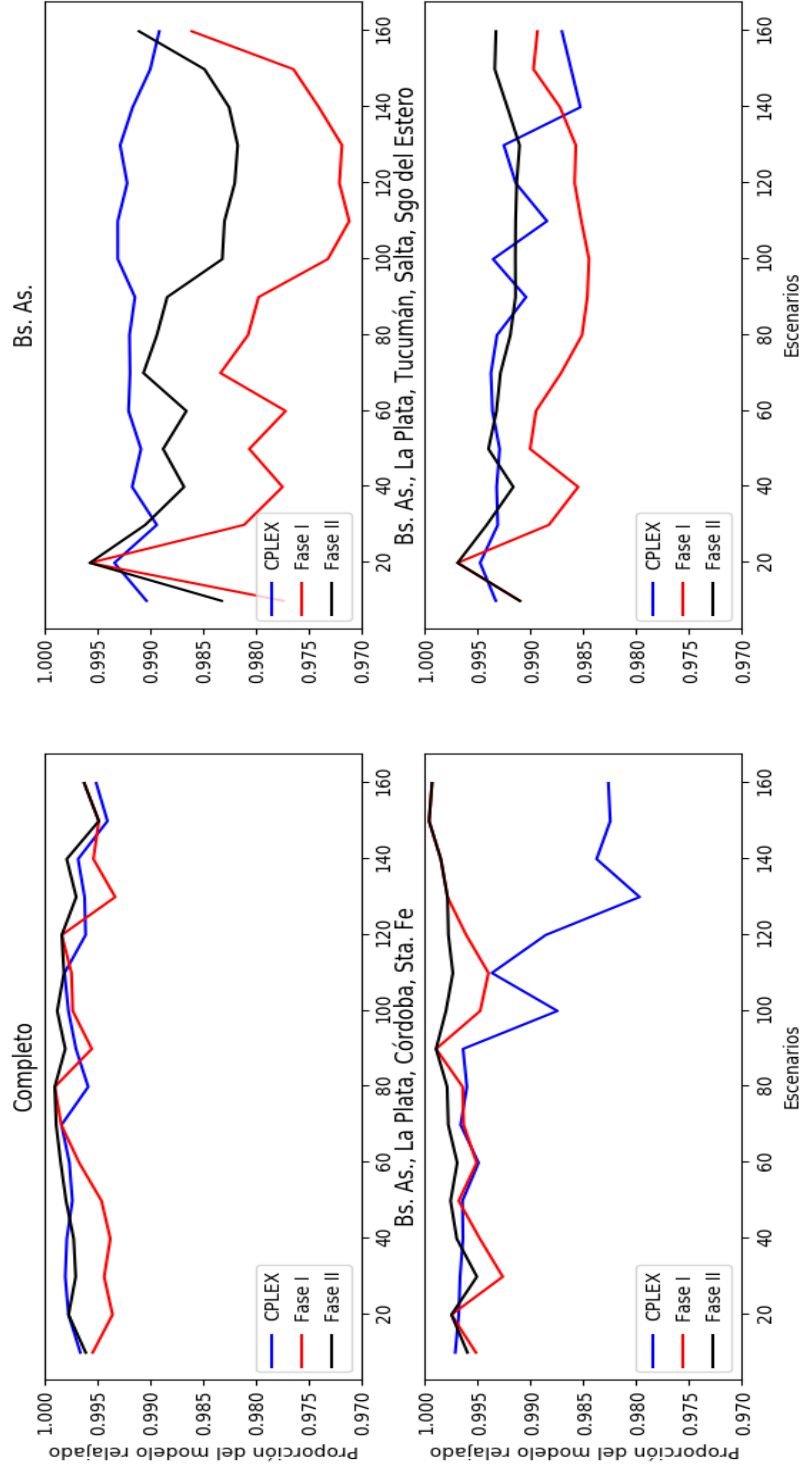


FIGURA (6.10). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia de 6 centros de distribución.

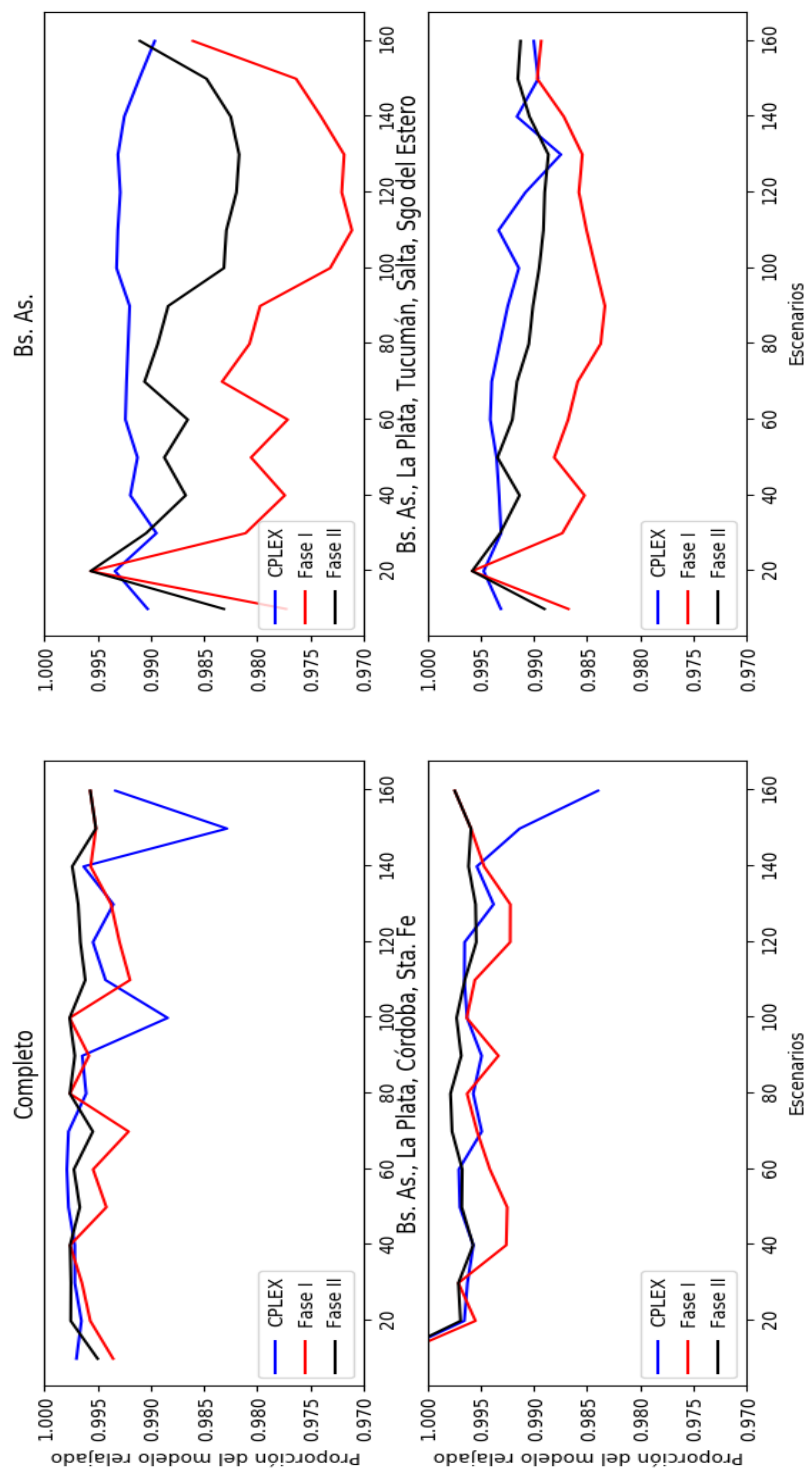


FIGURA (6.11). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia de 8 centros de distribución.

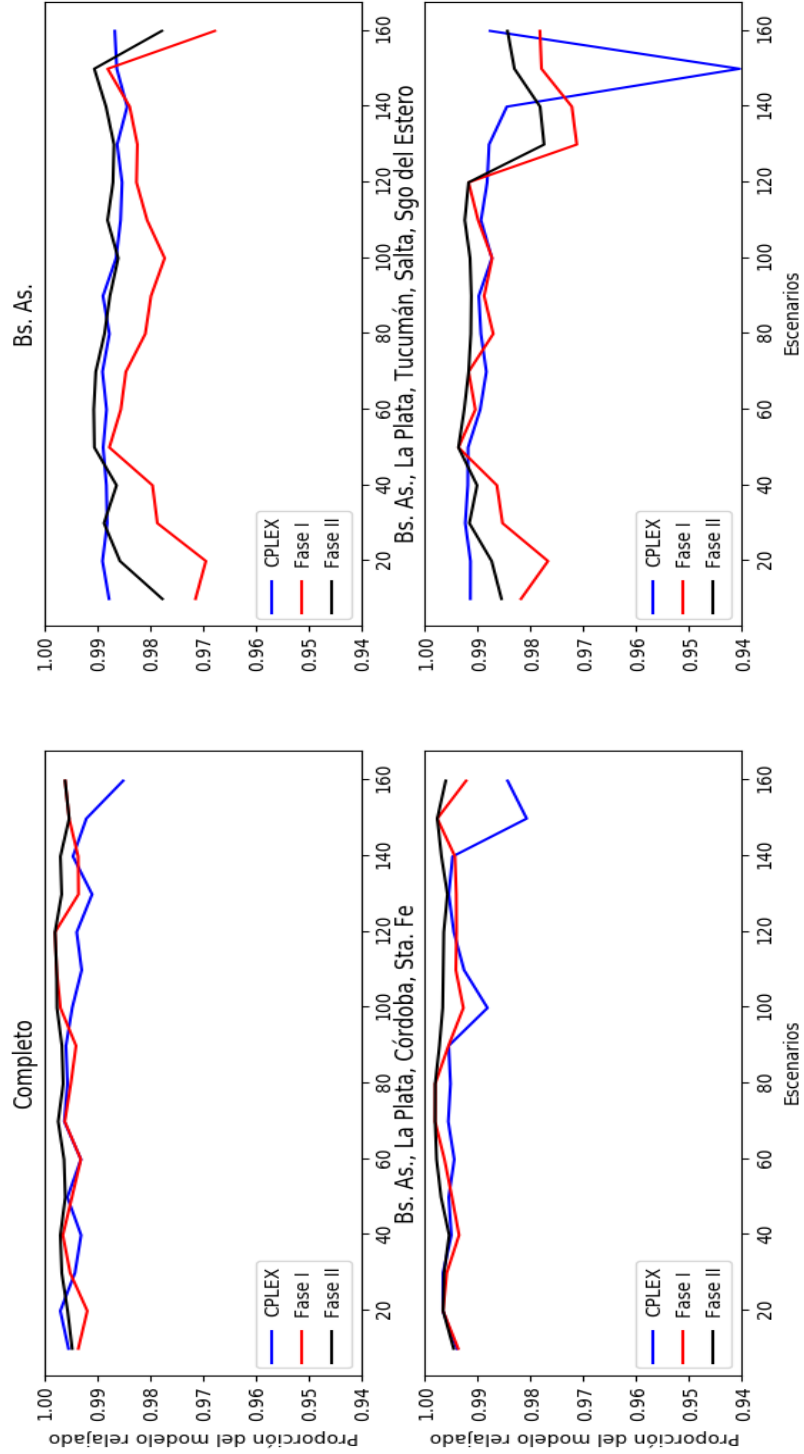


FIGURA (6.12). Valores de la función objetivo como proporción del valor de la función objetivo de la relajación lineal para la instancia de 10 centros de distribución.

CUADRO (6.5). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia Buenos Aires con 6 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	41.42	41.02	0.39	0.9903	40.48	40.72	0.9832
20	41.16	40.89	0.19	0.9933	40.99	40.99	0.9957
30	41.44	41.00	0.83	0.9893	40.66	41.04	0.9904
40	40.84	40.50	0.45	0.9917	39.92	40.30	0.9868
50	41.11	40.73	0.52	0.9908	40.31	40.65	0.9887
60	40.82	40.49	0.36	0.9920	39.88	40.27	0.9865
70	40.55	40.22	0.39	0.9919	39.87	40.17	0.9906
80	40.44	40.12	0.52	0.9919	39.66	40.01	0.9893
90	40.21	39.87	0.44	0.9914	39.40	39.75	0.9884
100	40.19	39.91	0.32	0.9930	39.11	39.51	0.9831
110	40.12	39.84	0.25	0.9930	38.96	39.44	0.9829
120	40.14	39.82	0.41	0.9921	39.02	39.41	0.9820
130	39.99	39.71	0.29	0.9928	38.87	39.26	0.9817
140	39.96	39.63	0.49	0.9916	38.92	39.26	0.9825
150	39.92	39.52	0.66	0.9900	38.98	39.31	0.9848
160	39.97	39.54	0.73	0.9891	39.42	39.61	0.9910

CUADRO (6.6). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia centro con 6 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	139.30	138.90	0.23	0.9971	138.62	138.73	0.9959
20	141.33	140.88	0.27	0.9968	140.97	140.97	0.9975
30	141.56	141.08	0.28	0.9966	140.51	140.86	0.9950
40	139.91	139.40	0.29	0.9964	139.18	139.48	0.9970
50	140.07	139.56	0.31	0.9964	139.61	139.72	0.9975
60	139.48	138.77	0.46	0.9949	138.79	139.05	0.9969
70	140.01	139.53	0.29	0.9966	139.49	139.69	0.9978
80	139.73	139.17	0.34	0.9960	139.23	139.43	0.9979
90	140.09	139.58	0.32	0.9964	139.94	139.94	0.9989
100	140.98	139.21	1.20	0.9874	140.24	140.70	0.9980
110	140.53	139.64	0.57	0.9936	139.68	140.16	0.9973
120	140.46	138.85	1.09	0.9885	139.91	140.15	0.9977
130	140.14	137.28	2.01	0.9796	139.83	139.83	0.9978
140	140.52	138.23	1.59	0.9837	140.30	140.30	0.9985
150	137.89	135.47	1.71	0.9824	137.84	137.84	0.9996
160	138.13	135.72	1.69	0.9826	138.03	138.03	0.9993

CUADRO (6.7). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia partida con 6 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	52.40	52.04	0.32	0.9933	51.92	51.92	0.9910
20	52.23	51.95	0.21	0.9947	52.06	52.06	0.9969
30	52.62	52.25	0.49	0.9931	52.00	52.31	0.9941
40	51.90	51.54	0.42	0.9932	51.14	51.46	0.9916
50	52.03	51.66	0.54	0.9929	51.51	51.72	0.9940
60	51.62	51.29	0.43	0.9936	51.08	51.27	0.9932
70	51.54	51.21	0.42	0.9937	50.87	51.17	0.9928
80	51.40	51.05	0.46	0.9931	50.63	50.98	0.9919
90	51.16	50.67	0.77	0.9904	50.37	50.72	0.9914
100	51.01	50.68	0.45	0.9935	50.21	50.57	0.9914
110	50.83	50.24	0.95	0.9884	50.08	50.39	0.9914
120	50.82	50.38	0.66	0.9914	50.10	50.38	0.9913
130	50.68	50.30	0.54	0.9925	49.96	50.23	0.9910
140	50.65	49.90	1.28	0.9853	50.00	50.25	0.9922
150	50.63	49.92	1.19	0.9861	50.10	50.29	0.9934
160	50.75	50.09	1.10	0.9870	50.20	50.40	0.9933

CUADRO (6.8). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia completa con 8 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	173.52	173.00	0.22	0.9970	172.40	172.66	0.9950
20	173.64	173.04	0.27	0.9965	172.90	173.22	0.9975
30	174.52	174.02	0.22	0.9972	173.90	174.08	0.9975
40	172.69	172.20	0.21	0.9972	172.27	172.27	0.9976
50	173.30	172.91	0.18	0.9977	172.29	172.73	0.9967
60	172.04	171.68	0.16	0.9979	171.26	171.57	0.9972
70	172.28	171.89	0.17	0.9977	170.92	171.50	0.9955
80	171.99	171.31	0.33	0.9961	171.58	171.58	0.9976
90	172.40	171.79	0.30	0.9965	171.68	171.91	0.9972
100	173.53	171.52	1.11	0.9884	173.12	173.12	0.9976
110	173.12	172.13	0.52	0.9943	171.73	172.45	0.9962
120	173.05	172.26	0.40	0.9954	171.83	172.46	0.9966
130	172.69	171.57	0.59	0.9935	171.61	172.14	0.9968
140	172.88	172.24	0.31	0.9963	172.13	172.43	0.9974
150	169.95	167.03	1.66	0.9828	169.13	169.13	0.9952
160	170.44	169.30	0.59	0.9933	169.71	169.71	0.9957

CUADRO (6.9). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia Buenos Aires con 8 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	41.42	41.02	0.47	0.9903	40.48	40.72	0.9832
20	41.16	40.89	0.14	0.9934	40.99	40.99	0.9957
30	41.44	41.01	0.53	0.9895	40.66	41.05	0.9905
40	40.84	40.51	0.36	0.9919	39.92	40.30	0.9867
50	41.11	40.75	0.28	0.9913	40.31	40.65	0.9887
60	40.82	40.51	0.32	0.9924	39.88	40.27	0.9865
70	40.55	40.24	0.34	0.9923	39.87	40.17	0.9906
80	40.44	40.13	0.30	0.9921	39.67	40.01	0.9894
90	40.21	39.89	0.38	0.9920	39.40	39.75	0.9884
100	40.19	39.92	0.17	0.9932	39.11	39.51	0.9831
110	40.12	39.85	0.24	0.9931	38.96	39.44	0.9829
120	40.14	39.85	0.14	0.9929	39.02	39.41	0.9820
130	39.99	39.72	0.19	0.9931	38.87	39.26	0.9817
140	39.96	39.66	0.25	0.9925	38.92	39.26	0.9825
150	39.92	39.56	0.45	0.9911	38.98	39.31	0.9848
160	39.97	39.56	0.58	0.9896	39.42	39.62	0.9910

CUADRO (6.10). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia centro con 8 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	138.30	138.87	0.38	1.0042	138.81	138.88	1.0042
20	141.01	140.52	0.26	0.9965	140.37	140.57	0.9969
30	141.52	140.98	0.30	0.9962	141.10	141.10	0.9971
40	139.74	139.14	0.37	0.9957	138.71	139.14	0.9957
50	139.85	139.43	0.25	0.9970	138.80	139.40	0.9968
60	139.30	138.89	0.23	0.9971	138.48	138.84	0.9967
70	139.77	139.06	0.46	0.9949	139.12	139.45	0.9977
80	139.57	138.97	0.36	0.9957	139.05	139.27	0.9978
90	139.84	139.13	0.43	0.9949	138.91	139.40	0.9968
100	140.77	140.25	0.30	0.9963	140.26	140.39	0.9973
110	140.29	139.81	0.29	0.9965	139.67	139.80	0.9965
120	140.26	139.77	0.27	0.9965	139.17	139.62	0.9954
130	139.90	139.03	0.57	0.9938	138.81	139.27	0.9955
140	140.29	139.64	0.40	0.9954	139.54	139.75	0.9961
150	137.63	136.44	0.78	0.9913	137.07	137.07	0.9959
160	137.89	135.68	1.53	0.9840	137.54	137.54	0.9974

CUADRO (6.11). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia partida con 8 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	52.78	52.41	0.38	0.9931	52.08	52.20	0.9890
20	52.55	52.28	0.27	0.9947	52.33	52.33	0.9958
30	52.89	52.52	0.44	0.9931	52.22	52.53	0.9932
40	52.20	51.85	0.43	0.9933	51.43	51.75	0.9913
50	52.34	52.00	0.41	0.9935	51.72	51.99	0.9934
60	51.88	51.58	0.35	0.9941	51.20	51.47	0.9920
70	51.79	51.48	0.38	0.9940	51.06	51.36	0.9916
80	51.67	51.32	0.45	0.9932	50.83	51.18	0.9905
90	51.40	51.01	0.53	0.9925	50.54	50.89	0.9901
100	51.25	50.81	0.63	0.9914	50.44	50.71	0.9895
110	51.06	50.72	0.45	0.9933	50.30	50.50	0.9891
120	51.01	50.54	0.69	0.9908	50.28	50.44	0.9890
130	50.87	50.24	1.04	0.9875	50.13	50.30	0.9886
140	50.82	50.39	0.61	0.9916	50.17	50.33	0.9904
150	50.75	50.23	0.82	0.9896	50.23	50.32	0.9915
160	50.89	50.38	0.78	0.9900	50.35	50.45	0.9913

CUADRO (6.12). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia completa con 10 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	169.91	169.13	0.38	0.9954	168.82	169.01	0.9947
20	170.11	169.59	0.24	0.9969	168.72	169.35	0.9955
30	170.59	169.60	0.50	0.9942	169.75	170.02	0.9967
40	168.68	167.50	0.63	0.9930	168.08	168.16	0.9969
50	169.39	168.64	0.38	0.9956	168.50	168.71	0.9960
60	168.31	167.13	0.64	0.9930	167.14	167.67	0.9962
70	168.51	167.87	0.32	0.9962	167.85	168.06	0.9973
80	168.37	167.63	0.38	0.9956	167.52	167.76	0.9964
90	168.82	168.12	0.35	0.9959	167.80	168.25	0.9966
100	169.99	169.08	0.47	0.9947	169.46	169.57	0.9976
110	169.51	168.30	0.64	0.9929	169.11	169.11	0.9976
120	169.57	168.53	0.55	0.9938	169.22	169.22	0.9979
130	169.02	167.48	0.85	0.9909	167.92	168.46	0.9967
140	169.08	168.15	0.48	0.9945	167.99	168.55	0.9969
150	165.42	164.10	0.71	0.9920	164.64	164.64	0.9953
160	165.86	163.38	1.43	0.9850	165.20	165.20	0.9960

CUADRO (6.13). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia Buenos Aires con 10 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	38.68	38.20	0.59	0.9877	37.57	37.81	0.9776
20	38.21	37.78	0.67	0.9889	37.04	37.66	0.9856
30	38.35	37.90	0.73	0.9881	37.53	37.92	0.9887
40	37.72	37.28	0.69	0.9882	36.95	37.21	0.9863
50	37.97	37.54	0.65	0.9888	37.50	37.61	0.9905
60	37.65	37.21	0.67	0.9882	37.11	37.30	0.9906
70	37.31	36.90	0.63	0.9889	36.73	36.95	0.9902
80	37.20	36.74	0.77	0.9876	36.49	36.78	0.9886
90	37.04	36.63	0.64	0.9889	36.29	36.58	0.9875
100	36.98	36.48	0.92	0.9864	36.14	36.47	0.9860
110	36.90	36.36	0.99	0.9855	36.18	36.45	0.9880
120	36.90	36.35	1.03	0.9853	36.25	36.42	0.9870
130	36.76	36.25	0.96	0.9862	36.11	36.27	0.9868
140	36.68	36.11	1.14	0.9843	36.09	36.25	0.9883
150	36.57	36.07	0.93	0.9862	36.13	36.23	0.9905
160	36.55	36.06	0.90	0.9866	35.37	35.74	0.9777

CUADRO (6.14). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia centro con 10 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	138.51	137.66	0.54	0.9939	137.63	137.75	0.9945
20	139.48	138.99	0.25	0.9965	138.99	138.99	0.9965
30	140.04	139.55	0.27	0.9965	139.45	139.52	0.9963
40	138.20	137.50	0.43	0.9949	137.30	137.55	0.9953
50	138.51	137.88	0.39	0.9954	137.79	138.08	0.9969
60	137.99	137.21	0.49	0.9944	137.47	137.68	0.9977
70	138.40	137.78	0.38	0.9955	138.13	138.13	0.9980
80	138.30	137.62	0.42	0.9951	138.02	138.02	0.9980
90	138.64	138.01	0.37	0.9954	138.01	138.25	0.9972
100	139.64	137.98	1.13	0.9881	138.62	139.16	0.9966
110	139.10	138.05	0.69	0.9925	138.27	138.60	0.9965
120	139.13	138.36	0.49	0.9945	138.29	138.62	0.9964
130	138.72	138.08	0.39	0.9954	137.88	138.12	0.9957
140	139.03	138.29	0.45	0.9947	138.23	138.58	0.9968
150	135.89	133.26	1.86	0.9807	135.56	135.56	0.9976
160	136.06	133.92	1.48	0.9843	134.99	135.51	0.9960

CUADRO (6.15). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la instancia partida con 10 centros de distribución en las ejecuciones de la relajación lineal, variables enteras con tiempo límite de 20 minutos y fase 1 y 2 de la heurística de dos fases.

Escen.	Relajación lineal	Entero 20 min.	Gap %	Proporción Entero de RL	Fase 1	Fase 2	Proporción Fase 2 de RL
10	49.60	49.17	0.49	0.9913	48.69	48.87	0.9854
20	49.07	48.64	0.55	0.9913	47.92	48.45	0.9873
30	49.27	48.89	0.50	0.9923	48.54	48.85	0.9915
40	48.55	48.16	0.53	0.9918	47.89	48.07	0.9901
50	48.66	48.26	0.58	0.9918	48.35	48.35	0.9936
60	48.20	47.69	0.77	0.9895	47.74	47.84	0.9925
70	48.02	47.46	0.92	0.9883	47.62	47.62	0.9917
80	47.90	47.39	0.80	0.9893	47.28	47.48	0.9912
90	47.69	47.20	0.74	0.9897	47.15	47.27	0.9912
100	47.49	46.89	1.03	0.9873	46.89	47.08	0.9914
110	47.29	46.79	0.82	0.9893	46.81	46.93	0.9924
120	47.23	46.67	0.92	0.9882	46.83	46.83	0.9917
130	47.10	46.52	0.95	0.9878	45.74	46.03	0.9774
140	47.00	46.27	1.32	0.9844	45.69	45.97	0.9781
150	46.86	44.06	6.12	0.9404	45.82	46.06	0.9830
160	46.94	46.36	0.99	0.9876	45.91	46.20	0.9843

mejoras a realizar. A los efectos de encontrar un valor adecuado para ese parámetro se realizó un experimento agotando todas las posibles mejoras de todas las instancias y contando la cantidad de intentos en los que se logró mejorar el valor de la función objetivo.

En la Figura [6.13](#) se visualiza un histograma de la frecuencia relativa de la cantidad de mejoras que se realizaron hasta agotar todos los intentos de mejoras posibles. Se ve que, por ejemplo, en el 18 % de las instancias no se ha podido superar el valor de la función objetivo en los intentos posteriores a la primer mejora, en el 8 % no se logró otra mejora luego de la segunda.

Según este experimento, fijando el parámetro cantidad máxima de mejoras en el valor 10 se está cubriendo más del 97 % de los casos.

A continuación se evalúan los tiempos de ejecución de la heurística de dos fases, contemplando también el tiempo de resolución de la relajación lineal cuyos resultados son el ingreso a la primer fase de la heurística.

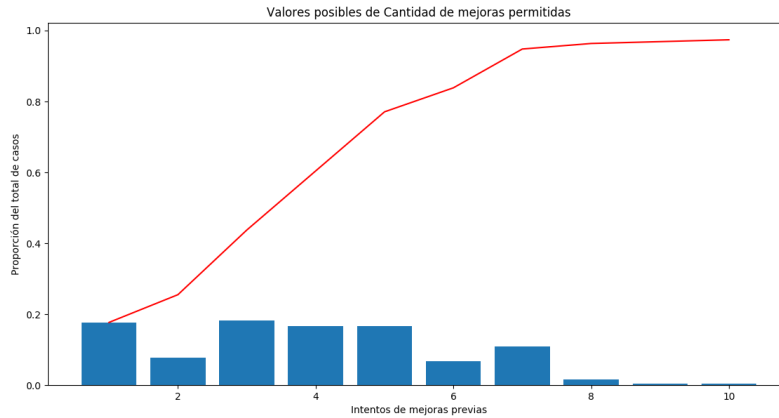


FIGURA (6.13). Cantidad de mejoras realizadas por la segunda fase de la heurística de dos fases.

En las Figuras [6.14](#), [6.15](#) y [6.16](#) se observan los tiempos de ejecución de la heurística para las instancias que utilizan 6, 8 y 10 centros de distribución respectivamente comenzando por el tiempo utilizado por CPLEX para encontrar el óptimo de la relajación lineal al cual se apilan los tiempos de la primera y segunda fase de la heurística. Todos los tiempos son inferiores a los 2 minutos a excepción de uno de ellos que lo supera levemente. Así mismo llama la atención que caiga el tiempo de ejecución de CPLEX cuando resuelve la relajación lineal con cantidad de escenarios cercanos a los 100 sin que pueda identificar la causa de esa variación.

5. Heurística de ajuste compensado con avance temporal

A continuación se detallan las pruebas realizadas con la heurística de ajuste compensado con avance temporal, descrita en la Sección [2](#) del Capítulo [5](#), en la cual se obtienen resultados con valor de la función objetivo inferiores [4](#) a los presentados en la heurística de la sección anterior.

La heurística parte de la solución del problema relajado, aplicando un ajuste compensado para los envíos a realizar desde las fábricas a los centros de distribución para ventanas de v períodos. A continuación se resuelve nuevamente el modelo

¹Recordemos que la orientación de la optimización establecida en la función objetivo es de maximización.

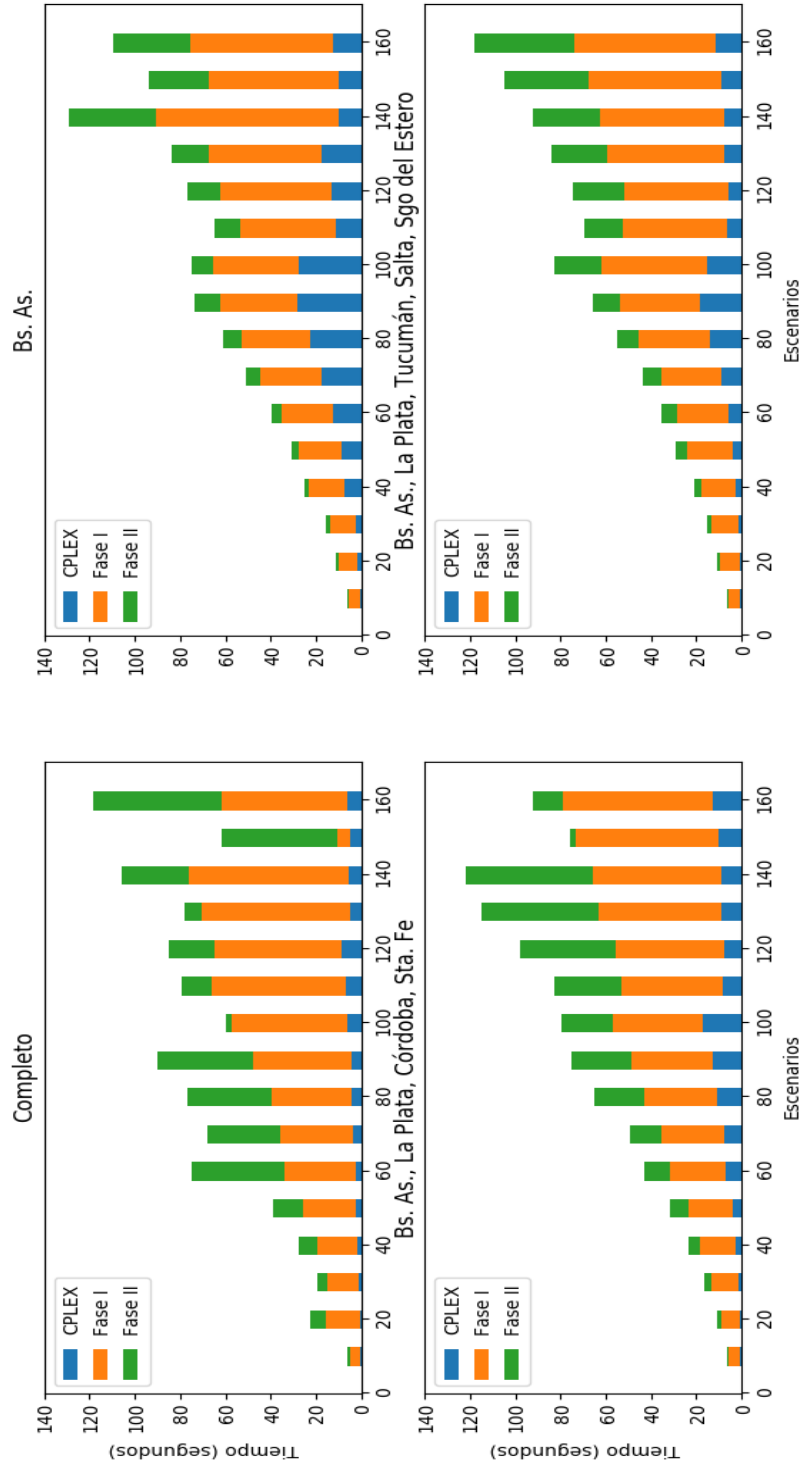


FIGURA (6.14). Tiempos de ejecución de la heurística de dos fases junto con el tiempo incurrido por CPLEX para la resolución de la relajación lineal para las instancias con 6 centros de distribución.

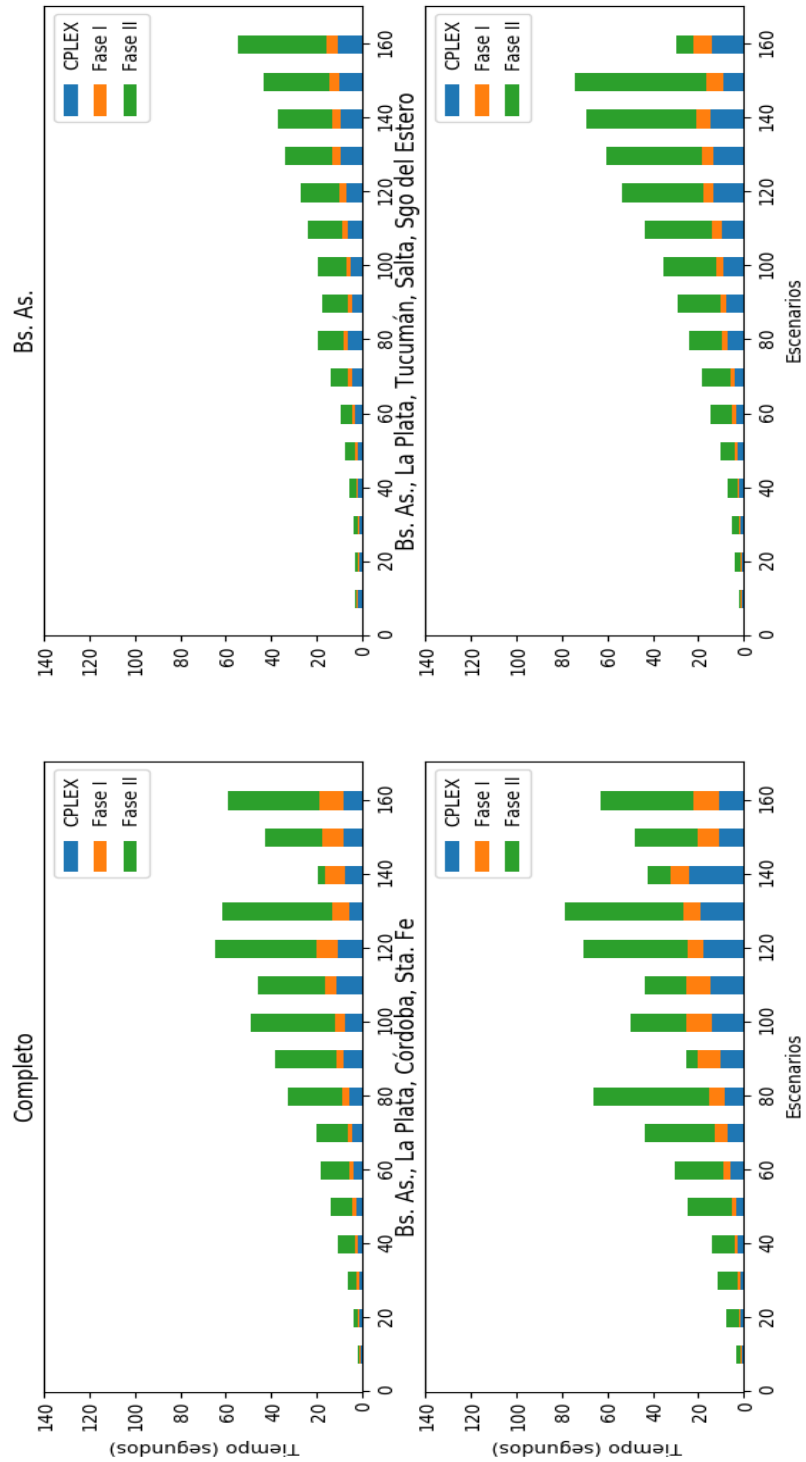


FIGURA (6.15). Tiempos de ejecución de la heurística de dos fases junto con el tiempo incurrido por CPLEX para la resolución de la relajación lineal para las instancias con 8 centros de distribución.

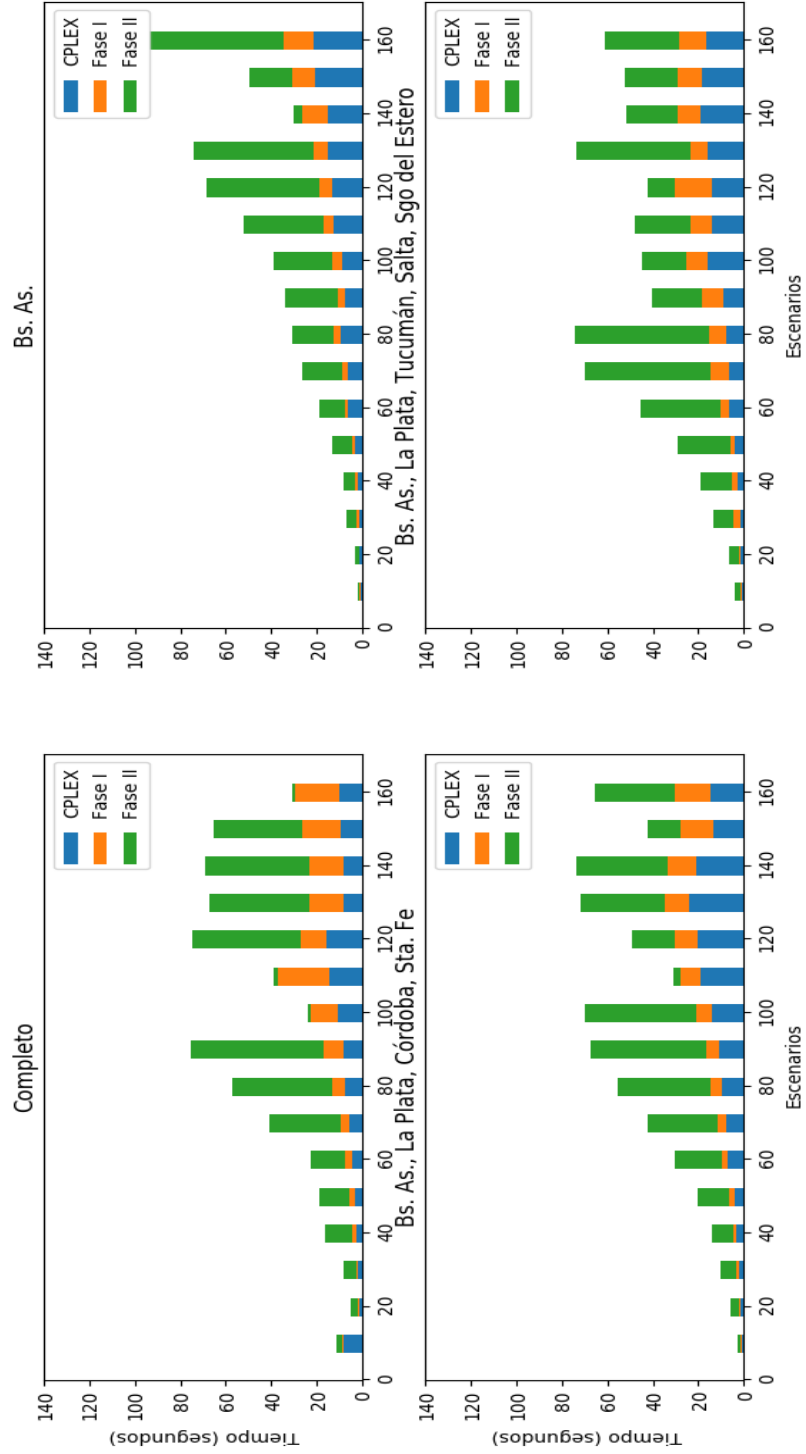


FIGURA (6.16). Tiempos de ejecución de la heurística de dos fases junto con el tiempo incurrido por CPLEX para la resolución de la relajación lineal para las instancias con 10 centros de distribución.

relajado al cual se le incorporan las restricciones que surgen del establecimiento de los valores que se han fijado en el período de la ventana. El proceso continúa hasta que se completan todos los períodos.

En la Figura [6.17](#) se puede observar en el eje de las ordenadas el cociente que se obtiene colocando en el numerador el valor de la función objetivo obtenido mediante la heurística de ajuste compensado con avance temporal y en el denominador el valor de la función objetivo obtenido mediante la heurística de dos fases. Se expresa este cociente en función de la cantidad de escenarios para las 4 instancias con la demanda concentrada en 6 centros de distribución.

Los experimentos se han producido con diferentes tamaños de ventana, utilizando 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 24 y 48, y para los diferentes subconjuntos de demanda al considerar (ver Sección [6.2](#)) todas las localidades, las localidades de la provincia de Buenos Aires, las localidades correspondiente a la instancia centro y por último las localidades correspondiente a la instancia partida.

Se observa que en muy pocas instancias se ha alcanzado el valor de la heurística de dos fases. A medida que aumenta la cantidad de períodos que se incluyen en la ventana, los valores son más cercanos a de la heurística de dos fases (costo de no contar con la información completa), acercándose los valores de las diferentes instancias de agrupamiento de demanda.

En la Figura [6.18](#) y en la Figura [6.19](#) se observa idéntica métrica para las instancias con la demanda concentrada en 8 y en 10 centros de distribución. Se ve que en muy pocas oportunidades la función objetivo alcanza el mismo valor alcanzado por la función objetivo en la heurística de dos fases.

En los Cuadros [6.16](#) - [6.25](#) se reportan los valores de la función objetivo expresado en millones de pesos para los cuatro grupos de instancias completo, Buenos Aires, centro y partida en las tres variantes de centros de distribución 6, 8 y 10 ubicaciones.

Desde otro punto de vista se observa ver en la Figura [6.20](#) el cociente graficado en las Figuras [6.17](#) a [6.19](#) en función de la cantidad de períodos que forman parte de la ventana deslizable para las instancias que concentran la demanda en 6 centros de

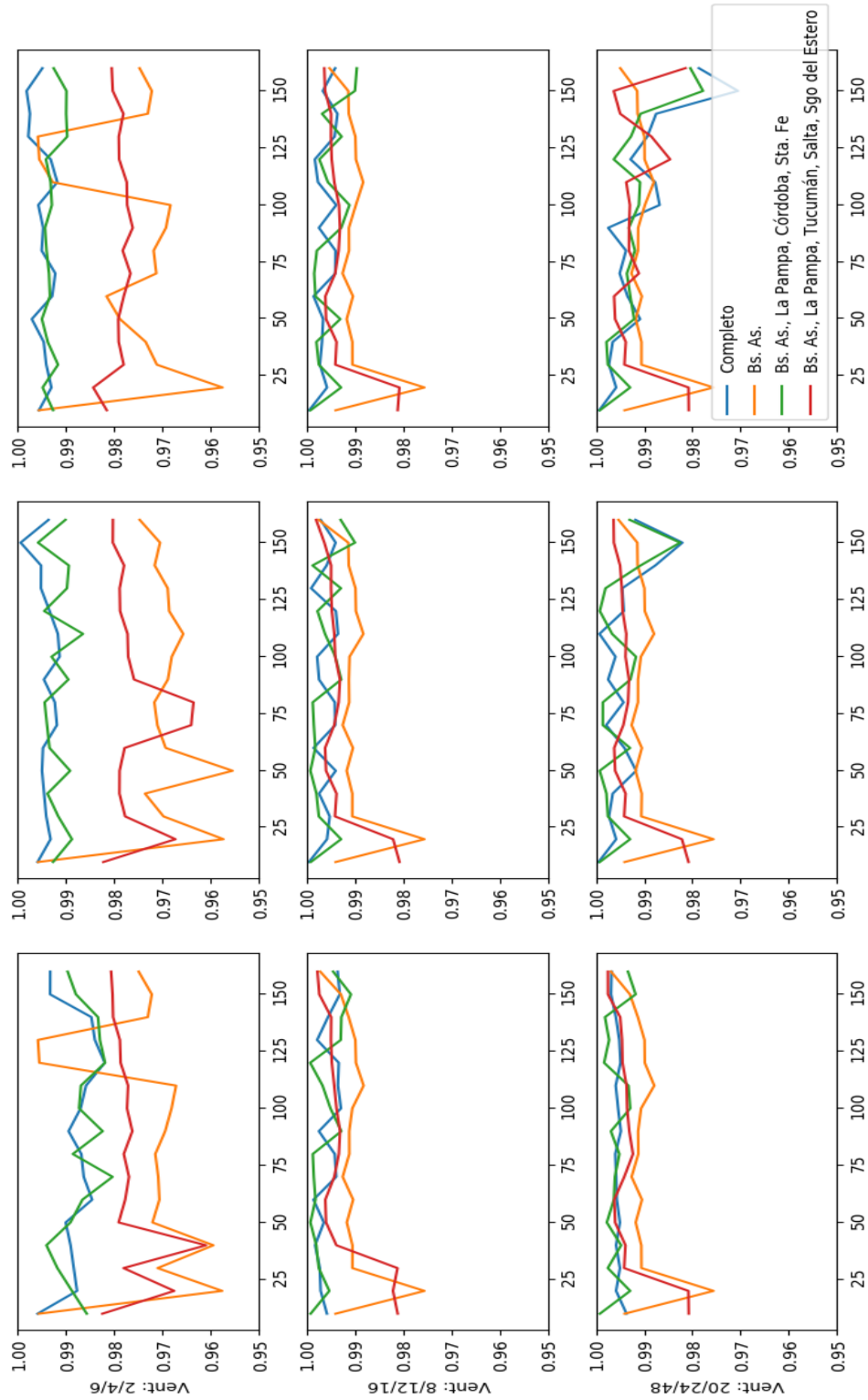


FIGURA (6.17). Cociente entre el valor de la función objetivo obtenido mediante la heurística de ajuste compensado con avance temporal y el valor de la función objetivo obtenido mediante la heurística de dos fases en función de la cantidad de escenarios considerados para las instancias de la demanda concentrada en 6 centros de distribución.

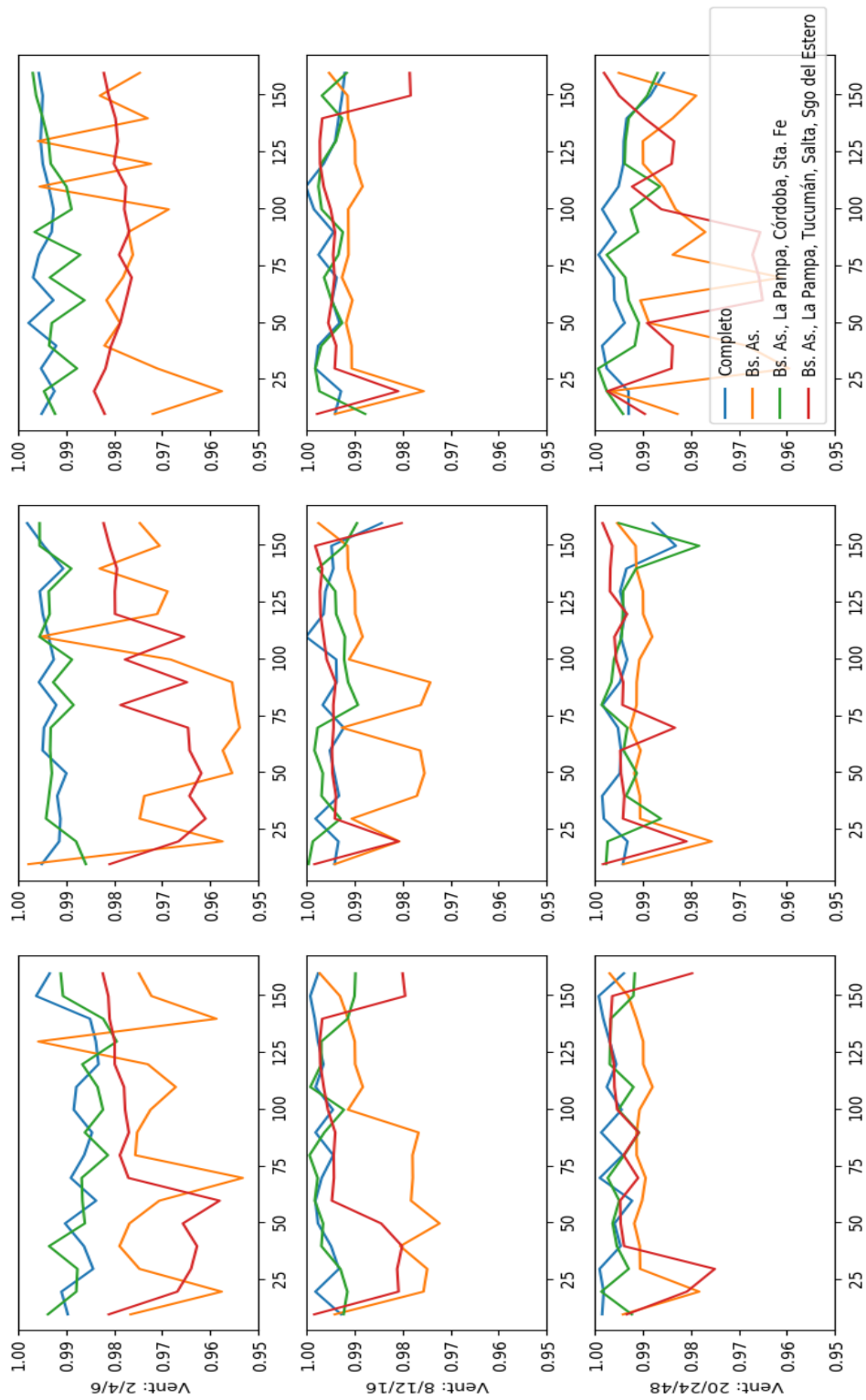


FIGURA (6.18). Idem Figura 6.17 pero con instancias de 8 centros de distribución.

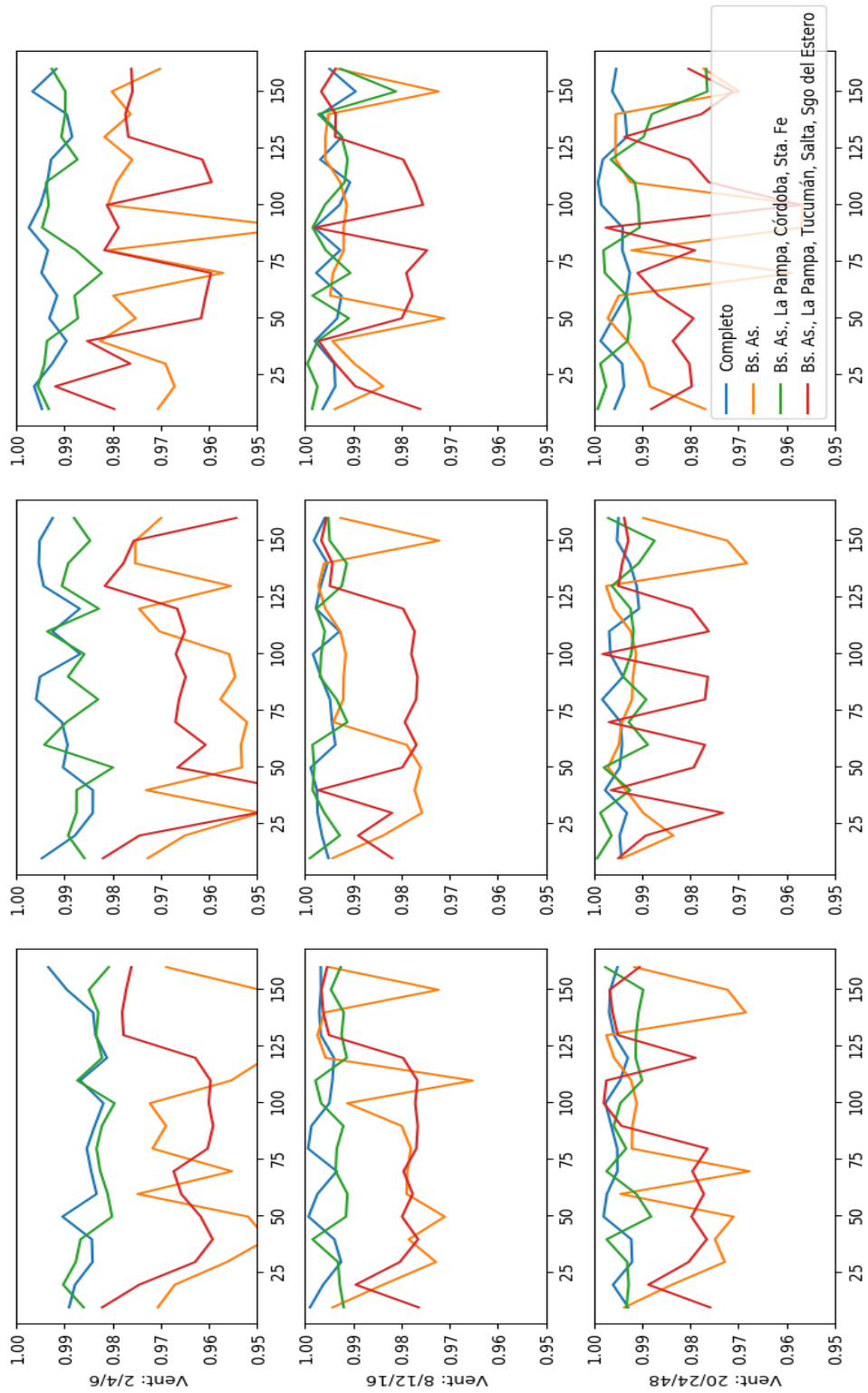


FIGURA (6.19). Idem Figura 6.17 pero con instancias de 10 centros de distribución.

CUADRO (6.16). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizable en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 1 período.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.61	40.54	136.75	51.01	171.86	40.54	136.94	51.30	167.17	36.70	136.81	47.93
20	171.28	39.25	139.39	50.37	170.68	39.25	138.89	50.57	167.31	36.42	137.53	47.20
30	171.60	39.86	139.69	51.15	171.36	39.85	139.37	50.67	167.31	36.01	137.79	47.00
40	170.16	39.23	137.70	50.38	169.91	39.24	137.27	50.01	165.52	35.26	135.76	46.42
50	170.12	39.51	138.21	50.65	171.07	39.52	137.48	50.18	166.11	35.66	135.33	45.79
60	169.09	39.08	137.18	50.15	168.82	39.09	136.99	49.59	164.90	35.50	135.07	46.23
70	169.67	38.32	137.96	50.00	169.61	39.21	137.64	49.18	165.47	35.83	135.74	46.07
80	169.40	38.25	137.85	49.20	169.22	38.87	136.67	50.10	165.30	35.72	135.72	45.88
90	170.09	38.00	137.52	49.52	169.27	38.53	137.48	49.72	165.56	35.43	135.81	45.67
100	170.87	38.25	138.17	49.42	171.09	38.25	138.04	49.58	166.53	35.45	136.32	45.20
110	170.27	38.15	137.35	49.25	170.36	38.19	137.50	49.39	165.86	35.42	135.86	45.04
120	169.56	38.23	137.87	49.31	169.60	38.23	137.74	49.42	166.04	34.51	136.17	45.08
130	169.34	39.10	137.59	49.17	169.39	39.10	137.42	49.29	165.65	34.44	135.84	45.01
140	169.72	38.20	138.07	49.27	169.87	38.20	137.27	49.38	164.87	34.39	136.24	44.96
150	168.52	38.23	136.39	49.32	168.72	38.22	136.68	49.38	163.25	34.40	133.46	45.01
160	169.32	38.62	136.89	49.43	168.43	38.62	136.16	49.56	163.25	34.62	134.65	45.10

CUADRO (6.17). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizable en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 2 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.61	40.54	136.75	51.01	170.87	39.77	138.02	51.21	167.16	36.70	135.82	48.00
20	171.28	39.25	139.39	50.37	171.65	39.25	138.87	50.60	167.29	36.42	137.63	47.21
30	171.59	39.85	139.70	51.16	171.36	40.01	139.36	50.64	167.33	36.26	137.80	47.03
40	170.15	38.66	138.66	49.45	169.91	39.45	138.25	49.82	165.52	35.27	135.72	46.11
50	171.09	39.51	138.20	50.64	171.04	39.71	137.46	50.21	167.09	35.80	135.33	46.50
60	169.04	39.08	137.18	50.13	168.78	39.08	136.98	49.31	164.87	36.36	135.06	46.20
70	169.65	39.00	136.95	49.99	169.61	38.29	137.60	50.18	165.45	35.29	135.72	46.07
80	169.37	38.87	137.84	49.86	169.22	39.04	136.67	50.10	165.30	35.73	135.72	45.59
90	170.09	38.53	137.47	49.52	169.27	38.76	137.46	49.72	165.50	35.44	135.79	45.34
100	170.88	38.25	138.91	49.42	171.12	38.42	137.91	49.58	166.50	35.45	136.32	45.20
110	170.22	38.14	138.32	49.24	170.37	38.14	137.49	49.39	166.86	34.83	136.85	45.04
120	169.56	39.24	137.61	49.30	169.58	38.35	137.75	49.43	166.04	34.52	136.15	45.09
130	169.34	39.10	137.45	49.16	169.35	39.10	136.41	49.29	165.68	34.45	135.82	45.01
140	169.72	38.20	137.97	49.26	169.85	37.64	137.27	49.38	165.86	34.38	136.22	44.96
150	167.82	38.22	136.17	49.30	168.49	38.22	135.79	49.38	162.91	34.39	133.51	45.01
160	168.49	38.62	136.60	49.43	168.59	38.62	136.32	49.56	164.10	34.62	132.91	45.10

distribución para 20, 50, 100 y 150 escenarios. Se ve que la relación se estabiliza a partir de que la ventana contiene 8 períodos en los 4 grupos de instancias Completa, Bs. As., Centro y Partida. Para el caso de 150 escenarios los grupos de instancias Completo y Centro se degradan levemente a cuando la cantidad de períodos de la ventana son iguales o superiores los 8 períodos.

En las Figuras [6.21](#) y [6.22](#) se observa la misma relación que en la Figura [6.20](#) con la diferencia que se toman aquellas instancias con la demanda concentrada en 8 y 10 centros de distribución.

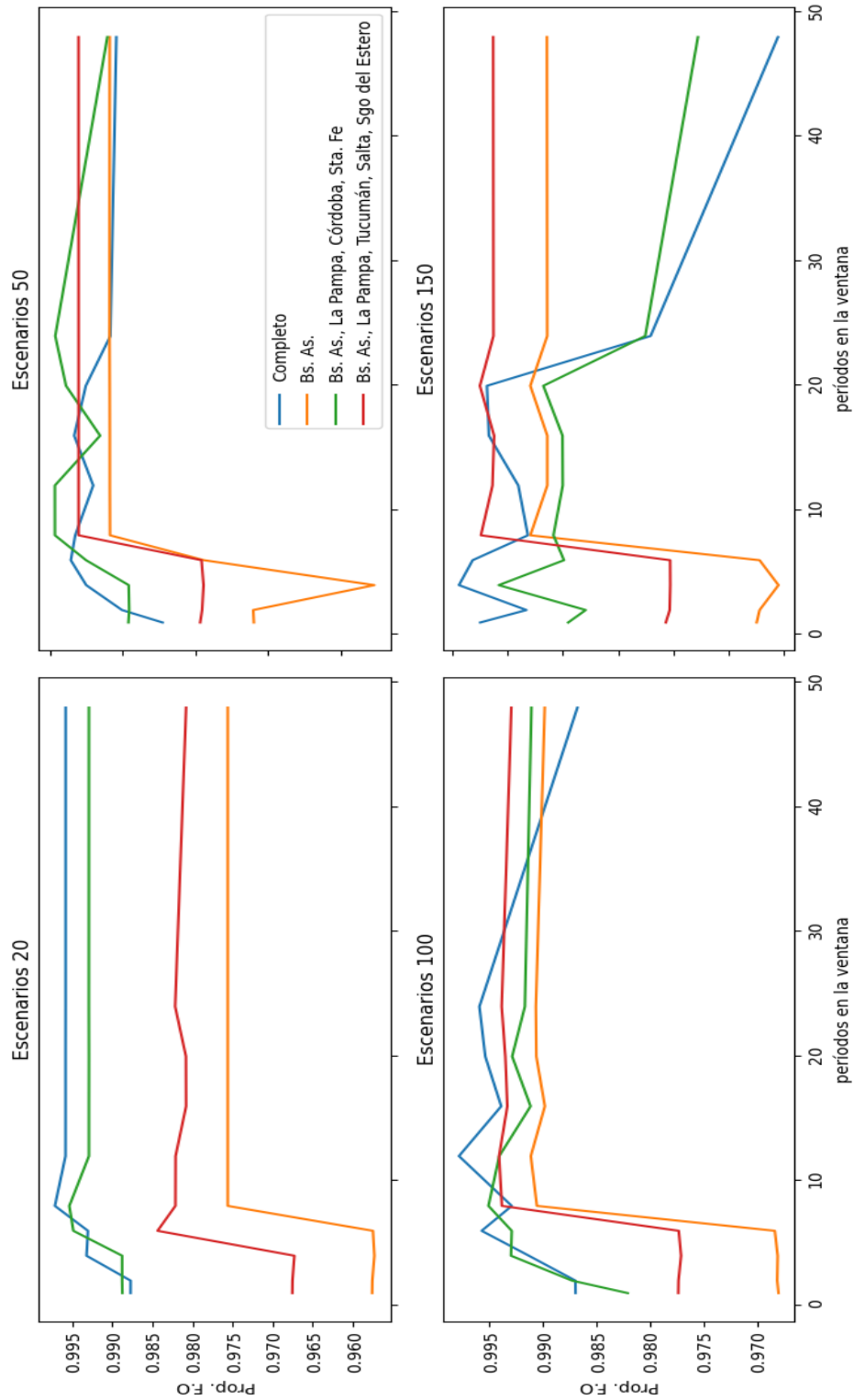


FIGURA (6.20). Cociente entre el valor de la función objetivo obtenido mediante la heurística de ajuste compensado con avance temporal y el valor de la función objetivo obtenido mediante la heurística de dos fases en función de la cantidad de períodos comprendidos en la ventana de avance temporal para las instancias de la demanda concentrada en 6 centros de distribución.

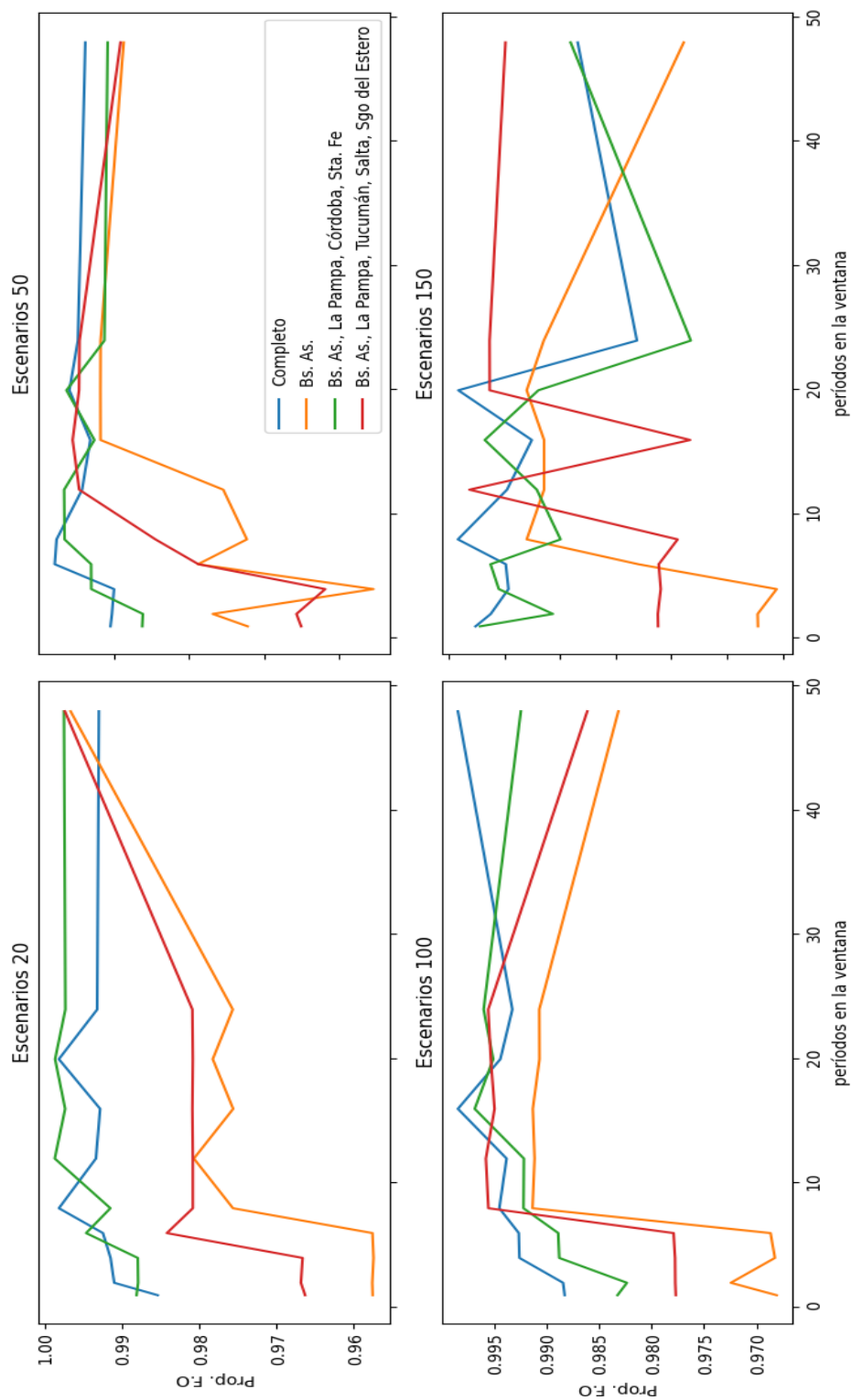


FIGURA (6.21). Idem Figura 6.20 pero con instancias de 8 centros de distribución.

CUADRO (6.18). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 4 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.60	40.55	137.72	51.00	171.81	40.63	136.92	51.20	168.11	36.78	135.80	47.99
20	172.24	39.24	139.39	50.36	171.73	39.24	138.87	50.59	167.29	36.34	137.49	47.21
30	172.58	39.80	139.68	51.14	172.55	40.01	140.28	50.48	167.32	36.00	137.78	46.41
40	171.09	39.24	138.63	50.37	170.87	39.24	138.25	49.91	165.49	36.20	135.83	45.30
50	171.93	38.84	138.21	50.63	170.99	38.84	138.42	50.01	167.07	35.84	135.31	46.73
60	170.79	39.03	138.13	50.13	170.69	38.55	137.91	49.63	165.88	35.56	136.87	45.96
70	170.61	39.00	138.85	49.32	170.57	38.31	138.50	49.54	166.47	35.18	136.69	46.05
80	170.32	38.88	138.66	49.12	170.21	38.20	137.66	50.09	167.07	35.22	135.68	45.87
90	170.97	38.51	138.47	49.50	171.17	37.98	138.38	49.10	167.42	34.92	136.76	45.61
100	171.63	38.25	139.71	49.41	171.83	38.26	138.81	49.59	167.32	34.85	137.20	45.52
110	171.22	38.08	138.26	49.24	171.36	39.26	139.18	48.76	167.83	35.37	137.71	45.29
120	171.54	38.18	139.38	49.31	171.58	38.27	138.70	49.42	166.99	35.49	136.25	45.27
130	171.26	38.04	138.41	49.16	171.37	38.04	138.38	49.28	167.50	34.66	136.81	45.19
140	171.52	38.15	138.82	49.14	170.81	38.60	138.20	49.30	167.76	35.36	137.09	44.95
150	168.85	38.15	137.26	49.30	168.22	38.15	136.45	49.37	163.84	35.33	133.48	44.93
160	168.54	38.61	136.67	49.41	169.39	38.61	136.93	49.55	163.95	34.66	133.89	44.09

CUADRO (6.19). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 6 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.56	40.54	137.72	50.96	171.81	39.58	137.81	51.26	168.11	36.70	136.82	47.88
20	172.21	39.24	140.25	51.25	171.90	39.25	139.81	51.51	168.72	36.42	138.36	48.05
30	172.58	39.86	139.68	51.16	173.25	39.86	139.38	51.57	168.75	36.74	138.70	47.69
40	171.11	39.23	138.62	50.38	170.91	39.57	138.24	50.75	166.41	36.56	136.68	47.36
50	172.30	39.79	139.02	50.64	172.35	39.79	138.42	50.89	167.55	36.67	136.31	46.50
60	170.46	39.53	138.12	50.14	170.31	39.53	136.92	50.31	166.25	36.55	136.01	45.96
70	170.66	39.01	138.79	49.97	170.96	39.29	138.53	50.14	167.18	35.36	135.68	45.70
80	170.79	38.89	138.60	49.87	170.83	39.06	137.47	50.10	166.66	36.08	136.30	46.61
90	171.00	38.52	139.15	49.51	170.71	38.83	138.92	49.71	167.81	34.44	137.50	46.26
100	172.40	38.26	139.70	49.42	171.85	38.27	138.83	49.59	168.72	35.77	138.23	46.20
110	171.25	39.15	139.20	49.25	171.36	39.26	138.39	49.37	168.01	35.69	137.74	45.03
120	171.50	39.24	139.33	49.32	171.58	38.33	138.67	49.44	168.00	35.54	136.86	45.02
130	171.71	39.10	138.40	49.17	171.34	39.10	138.39	49.25	166.50	35.61	136.82	44.96
140	171.92	38.20	138.89	49.15	171.58	38.20	139.03	49.31	166.79	35.39	137.18	44.93
150	168.64	38.22	136.44	49.30	168.26	38.64	136.56	49.37	164.09	35.51	134.18	44.95
160	168.76	38.61	137.00	49.42	168.98	38.61	137.12	49.55	163.82	34.67	134.51	45.10

Parecería que para esta heurística, un tamaño de ventana de 8 períodos puede ser la más adecuada de utilizar.

En la Figura [6.23](#) se pueden observar los tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con avance temporal para los tamaños de ventana de 8, 12, y 16 períodos comparados con el tiempo de ejecución de la heurística de dos fases para los cuatro grupos de demanda con la demanda centrada en 6 centros de distribución. Se puede observar que en la mayoría de las instancias los tiempos de ejecución se

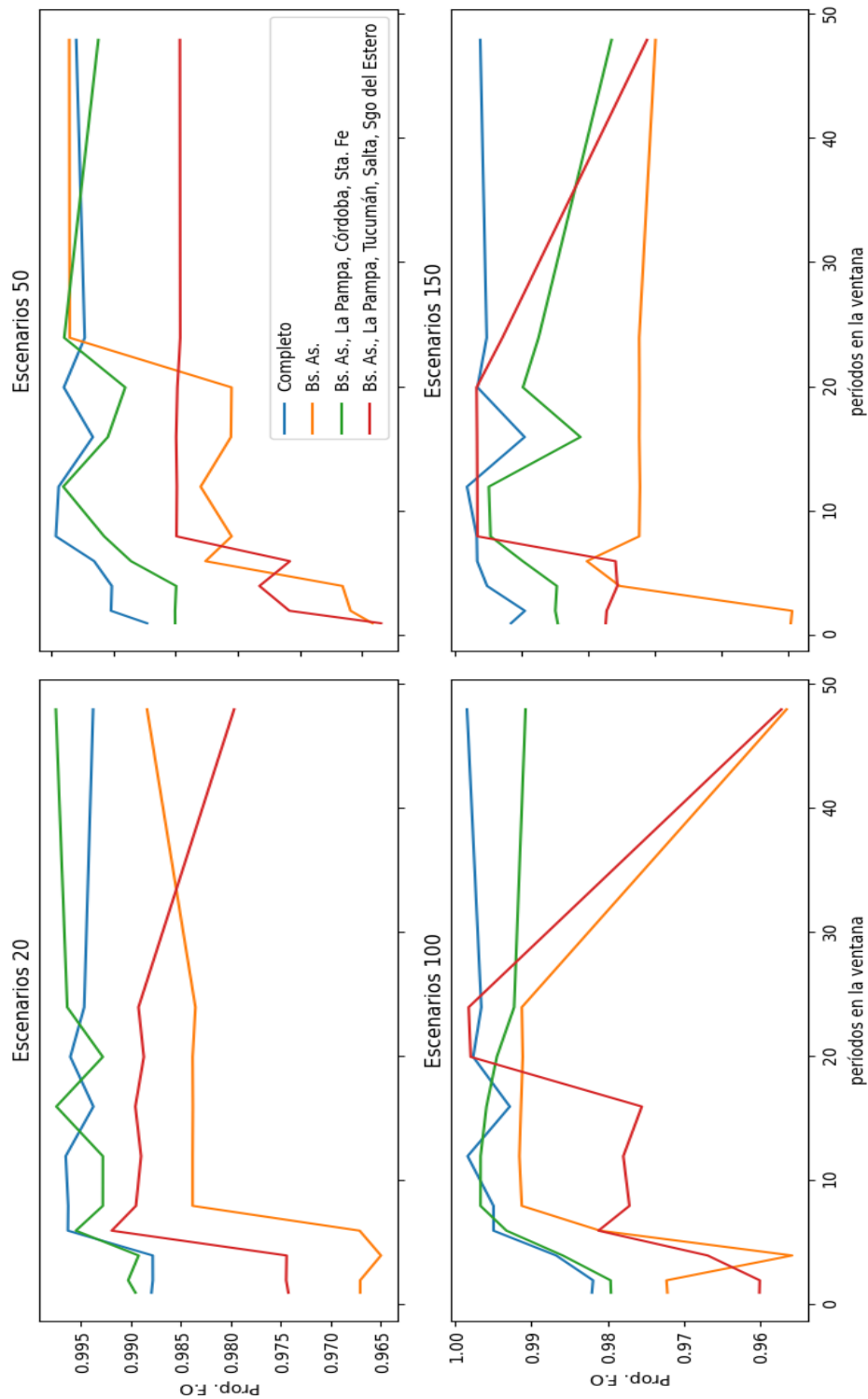


FIGURA (6.22). Idem Figura 6.20 pero con instancias de 10 centros de distribución.

CUADRO (6.20). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 8 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.59	40.48	138.63	50.95	171.41	40.48	137.80	52.11	168.84	37.60	136.64	47.72
20	172.92	39.99	140.32	51.13	172.89	39.99	139.37	51.33	168.72	37.05	137.99	47.94
30	173.14	40.66	140.51	51.32	172.90	40.01	140.10	51.54	168.75	36.89	138.57	47.89
40	171.74	39.92	139.21	51.14	171.39	39.51	138.71	50.72	167.14	36.41	137.34	46.94
50	172.19	40.31	139.62	51.51	172.31	39.52	138.92	51.19	168.59	36.52	136.91	47.38
60	171.45	39.88	138.80	51.08	171.24	39.39	138.60	51.20	167.24	36.51	136.47	46.77
70	170.96	39.87	139.49	50.87	170.95	39.28	139.12	51.06	166.96	36.16	137.25	46.65
80	170.64	39.66	139.26	50.64	170.62	39.13	139.18	50.89	167.66	35.97	137.11	46.38
90	171.47	39.40	138.94	50.37	171.58	38.82	138.87	50.58	168.03	35.85	137.15	46.16
100	171.91	39.14	140.01	50.26	172.17	39.17	139.29	50.49	168.72	36.15	138.70	46.01
110	171.55	38.97	139.70	50.11	172.12	38.97	139.68	50.32	168.15	35.19	138.31	45.84
120	171.54	39.01	140.05	50.12	171.85	39.01	139.18	50.30	168.21	36.26	137.42	45.88
130	171.72	38.87	138.85	49.98	171.72	38.87	138.83	50.16	167.90	36.18	137.07	45.81
140	171.60	38.92	139.30	50.00	172.13	38.92	138.55	50.17	168.06	36.11	137.47	45.80
150	167.79	39.04	136.58	50.16	168.99	39.04	135.69	49.29	164.10	35.22	134.84	45.90
160	168.54	39.51	137.28	50.29	169.29	39.51	136.14	49.44	164.66	35.56	134.51	45.99

CUADRO (6.21). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 12 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	172.24	40.48	138.62	50.93	171.64	40.48	138.82	52.11	168.19	37.60	137.61	47.99
20	172.69	39.99	139.97	51.13	172.06	40.19	140.38	51.33	168.76	37.05	137.99	47.91
30	172.79	40.66	140.51	52.00	173.75	40.66	140.10	52.22	169.58	37.00	138.97	47.97
40	171.60	39.92	139.21	51.14	171.10	39.37	138.70	51.43	167.75	36.36	137.34	47.94
50	171.77	40.31	139.62	51.51	171.72	39.65	138.92	51.71	168.51	36.70	137.82	47.38
60	171.45	39.88	138.80	51.08	170.73	39.31	138.61	51.20	166.62	36.51	137.47	46.73
70	170.99	39.87	139.49	50.88	170.16	39.87	139.12	51.07	167.13	36.73	136.92	46.64
80	170.64	39.66	139.26	50.65	170.99	39.06	137.77	50.89	166.90	36.48	137.12	46.38
90	171.47	39.40	138.94	50.37	170.83	38.72	138.18	50.58	167.69	36.29	137.82	46.17
100	172.76	39.16	139.86	50.27	172.05	39.16	139.29	50.50	169.30	36.16	138.70	46.05
110	171.54	38.98	139.63	50.11	172.47	38.98	138.68	50.32	167.90	36.19	138.04	45.87
120	171.64	39.01	139.84	50.12	171.85	39.01	138.75	50.30	168.84	36.26	138.30	45.88
130	171.94	38.87	138.84	49.97	171.46	38.87	138.43	50.15	167.91	36.17	137.06	45.80
140	171.64	38.92	140.14	50.00	171.46	38.92	139.41	50.17	167.77	36.11	137.39	45.71
150	167.94	38.98	136.46	50.11	168.24	38.98	135.99	50.23	164.34	35.22	134.87	45.90
160	169.14	39.52	137.06	50.31	167.05	39.52	136.09	49.45	164.52	35.47	134.86	46.00

encuentran cercanos a los 100 segundos, no existiendo grandes diferencias entre ellos.

En la Figura [6.24](#) se pueden observar los tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con avance temporal (similar a la Figura [6.23](#)) pero tomando las instancias de 8 centros de distribución observando, también, valores cercanos a los 100 segundos y que en la mayoría de los casos la heurística de dos fases se resuelve en un tiempo inferior a las restantes.

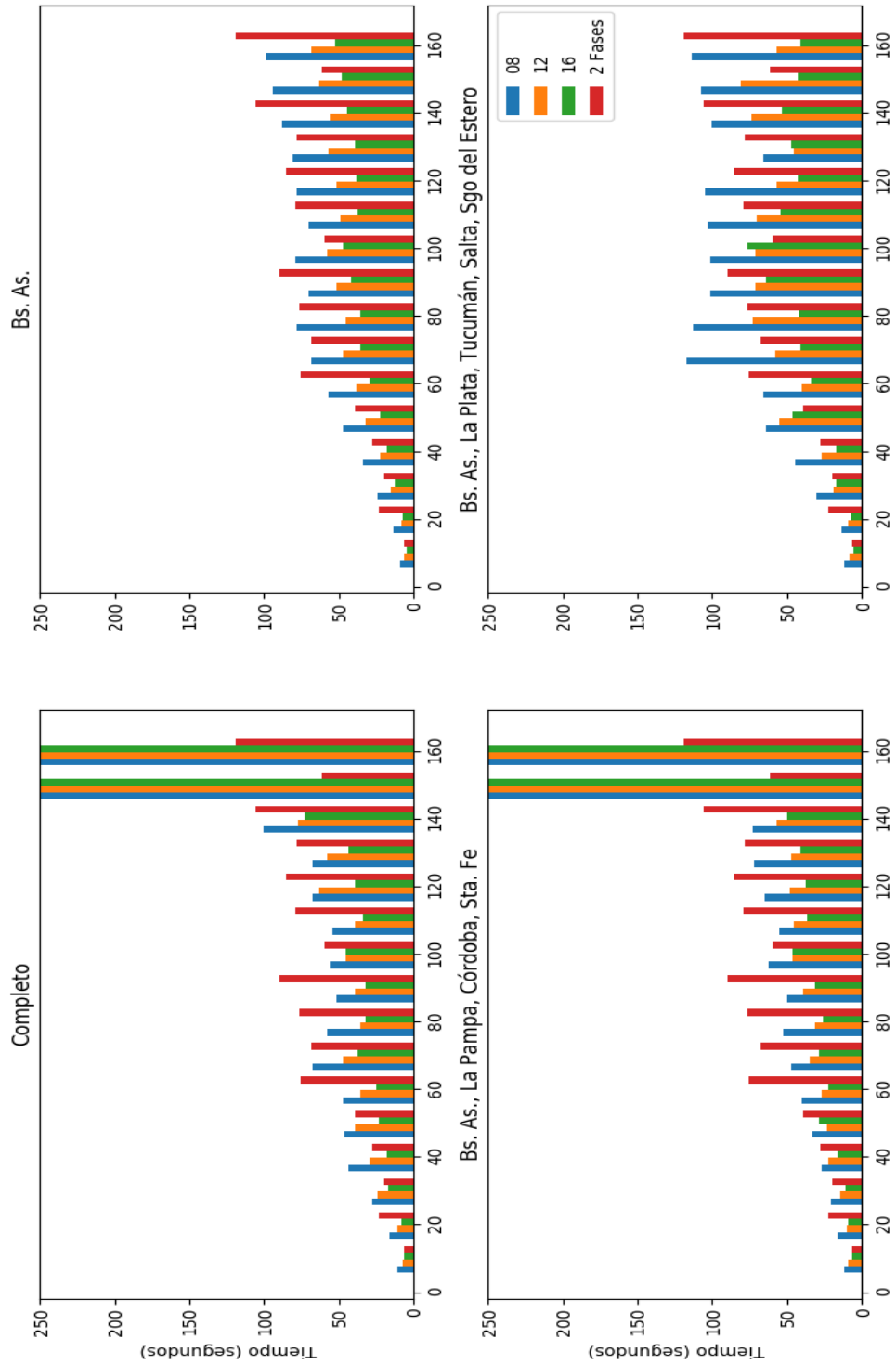


FIGURA (6.23). Tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con avance temporal para distintos tamaños de ventana comparados con el tiempo de ejecución de la heurística de dos fases para las instancias con 6 centros de distribución.

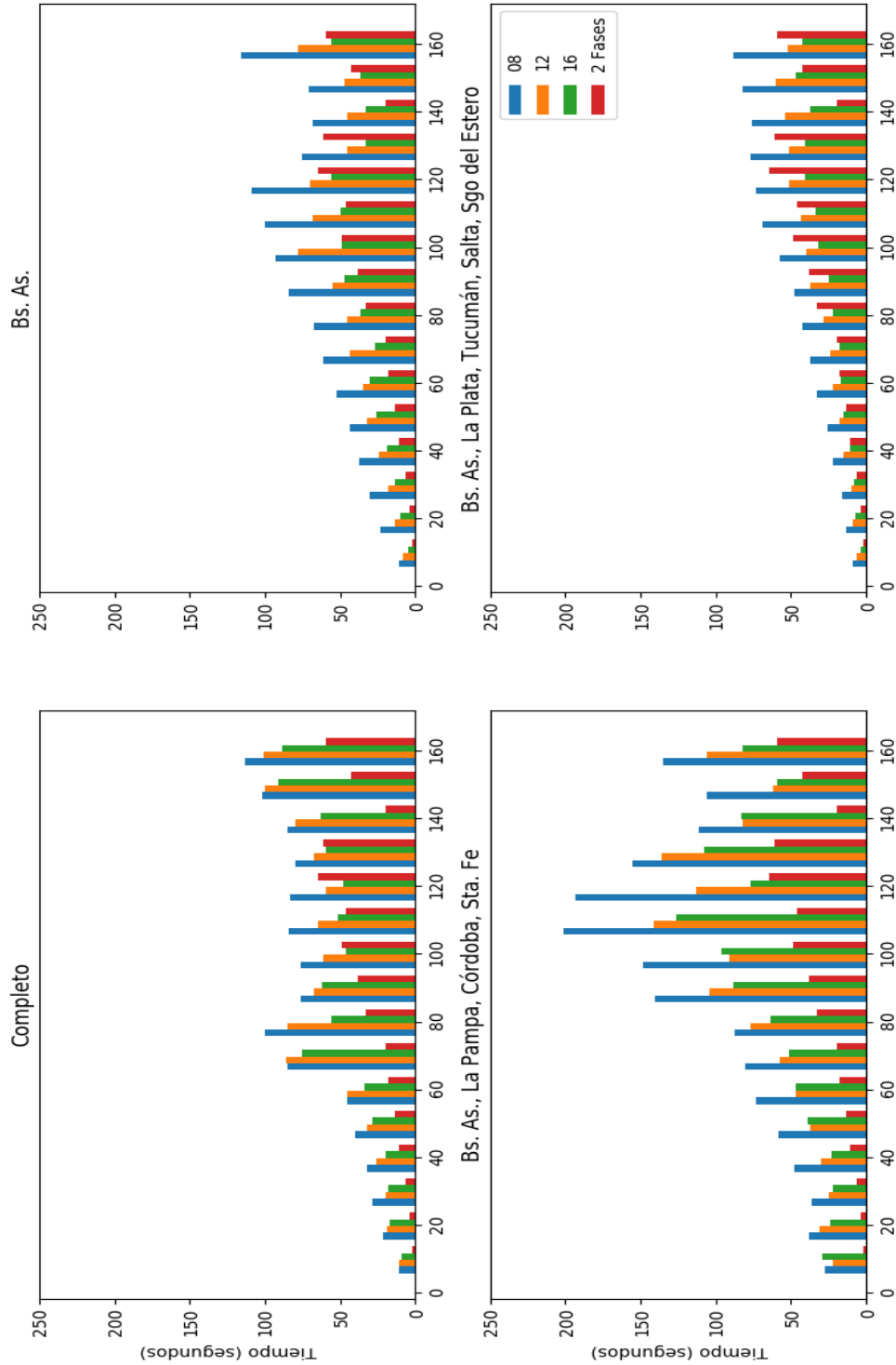


FIGURA (6.24). Tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con avance temporal para distintos tamaños de ventana comparados con el tiempo de ejecución de la heurística de dos fases para las instancias con 8 centros de distribución.

CUADRO (6.22). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 16 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	172.23	40.48	138.63	50.95	171.63	40.48	137.18	52.08	168.39	37.58	137.55	47.71
20	172.69	39.99	139.97	51.06	171.97	39.99	140.19	51.33	168.29	37.05	138.63	47.94
30	173.14	40.66	140.51	52.00	173.76	40.66	140.84	52.22	169.00	37.53	139.46	48.54
40	171.49	39.92	139.21	51.14	171.85	39.92	138.71	51.43	167.82	37.00	137.20	47.93
50	172.22	40.31	138.75	51.51	171.53	40.31	138.36	51.76	167.58	36.52	136.82	47.38
60	171.45	39.88	138.80	51.08	170.65	39.88	138.12	51.20	166.41	37.11	137.47	46.77
70	170.99	39.87	139.48	50.86	170.41	39.87	138.93	51.06	167.68	36.73	136.83	46.62
80	170.62	39.66	139.15	50.65	171.14	39.66	138.34	50.90	166.54	36.48	137.43	46.28
90	171.47	39.40	138.94	50.37	170.94	39.40	138.34	50.59	167.92	36.29	138.03	47.10
100	172.08	39.11	139.45	50.23	172.85	39.17	139.94	50.46	168.36	36.15	138.59	45.93
110	172.26	38.98	139.55	50.11	172.47	38.98	139.45	50.32	167.53	36.19	137.47	45.87
120	172.39	39.01	139.78	50.12	171.85	39.01	139.19	50.30	168.69	36.26	137.40	45.88
130	171.10	38.87	138.82	49.98	171.11	38.87	138.41	50.16	167.17	36.12	137.07	45.75
140	171.26	38.92	139.86	50.00	171.27	38.92	138.71	50.17	168.00	36.08	138.20	45.68
150	168.39	38.98	136.46	50.10	167.86	38.98	136.63	49.23	162.91	35.22	133.00	45.91
160	168.63	39.43	136.60	50.22	168.35	39.43	136.39	49.36	164.36	35.50	134.51	45.91

CUADRO (6.23). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 20 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.22	40.48	138.62	50.92	172.39	40.48	137.80	51.85	167.81	37.58	136.82	47.70
20	172.69	39.99	139.97	51.06	172.89	40.09	140.37	51.33	168.68	37.05	137.99	47.90
30	172.74	40.66	140.51	52.00	173.91	40.66	140.10	51.21	168.67	36.89	138.56	47.89
40	171.31	39.92	138.76	51.14	171.35	39.92	138.50	51.43	166.86	36.27	137.19	46.94
50	171.94	40.31	139.41	51.51	172.01	40.31	138.88	51.71	168.37	36.52	136.44	47.37
60	170.94	39.88	138.53	51.08	170.23	39.87	138.13	51.20	167.22	37.09	136.46	46.75
70	171.28	39.87	139.14	50.87	171.31	39.74	139.07	50.89	167.25	35.75	137.77	46.65
80	170.95	39.66	138.76	50.59	170.58	39.66	138.42	50.87	166.95	36.49	137.10	46.36
90	171.01	39.40	139.51	50.37	171.68	39.40	138.11	50.42	167.64	36.29	137.68	47.00
100	172.34	39.14	139.70	50.24	172.15	39.14	139.70	50.48	169.17	36.14	138.40	46.99
110	171.95	38.96	139.21	50.07	172.02	38.96	138.67	50.29	168.19	36.17	137.22	46.81
120	171.80	39.02	139.91	50.10	171.69	39.02	139.18	50.24	168.03	36.26	137.42	45.84
130	171.25	38.87	139.45	49.95	171.60	38.87	138.82	50.14	167.75	36.18	136.91	45.80
140	171.64	38.92	140.04	50.00	172.12	38.92	139.28	50.17	168.02	35.11	137.30	45.79
150	168.42	39.04	136.70	50.16	168.98	39.04	135.97	50.14	164.08	35.22	134.18	45.91
160	169.08	39.49	137.11	50.28	168.67	39.49	136.39	49.42	164.39	35.44	135.20	45.76

Similar a la Figura 6.23 pero para las instancias de 10 centros de distribución se ve en la Figura 6.25 manteniendo la misma observación cercana a los 100 segundos y el tiempo inferior (en la mayoría de los casos) a favor de la heurística de dos fases.

Se pueden observar valores anómalos en los casos de instancia completa y Bs. As., La Pampa, Córdoba, Sta. Fe con 150 y 160 escenarios utilizando 6 centros de distribución. Como se ve en el Cuadro 6.26, durante la experimentación se ha producido una sobrecarga de procesamiento que incrementó considerablemente los tiempos de ejecución de la heurística al realizar las compensación a valores enteros

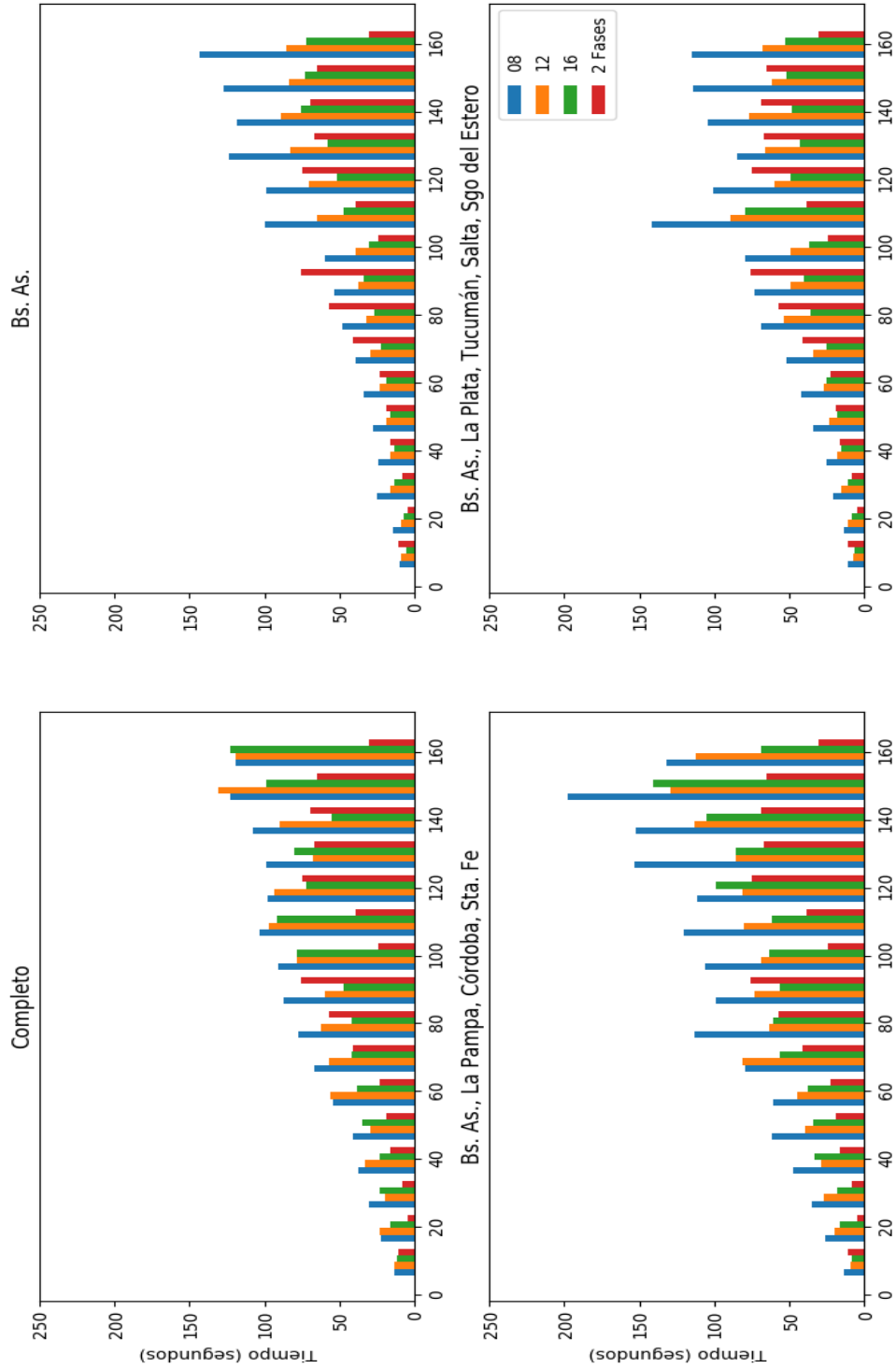


FIGURA (6.25). Tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con avance temporal para distintos tamaños de ventana comparados con el tiempo de ejecución de la heurística de dos fases para las instancias con 10 centros de distribución.

CUADRO (6.24). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 24 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	172.22	40.48	138.62	50.93	171.64	40.48	138.55	52.11	168.05	37.59	137.66	48.63
20	172.69	39.99	139.97	51.13	172.03	39.99	140.19	51.33	168.45	37.04	138.48	47.93
30	173.14	40.66	140.51	52.00	173.75	40.66	139.16	52.22	168.86	37.53	139.34	47.54
40	171.43	39.92	139.18	51.14	172.00	39.92	138.23	51.43	167.77	36.96	136.52	47.90
50	171.36	40.31	139.61	51.51	171.82	40.31	138.18	51.71	167.81	37.50	137.79	47.35
60	170.67	39.88	138.07	51.08	170.62	39.88	138.01	51.20	166.69	37.11	136.13	46.74
70	171.64	39.87	139.49	50.88	170.67	39.87	138.50	50.50	167.13	36.73	137.13	47.48
80	170.65	39.66	139.23	50.64	171.30	39.67	139.07	50.88	167.47	36.49	136.52	46.38
90	171.47	39.40	138.94	50.37	171.01	39.40	138.91	50.59	167.23	36.28	137.41	46.15
100	172.43	39.14	139.53	50.26	171.95	39.14	139.82	50.49	168.99	36.15	138.09	47.00
110	172.53	38.96	139.69	50.07	171.52	38.96	139.01	50.29	168.57	36.18	137.46	45.81
120	171.68	39.02	140.04	50.10	171.37	39.02	138.80	50.10	167.64	36.26	137.57	45.88
130	171.15	38.87	139.56	49.96	171.23	38.87	138.44	50.14	166.96	36.18	137.60	45.80
140	170.23	38.92	139.00	50.00	171.29	38.92	138.54	50.17	167.30	35.10	137.30	45.70
150	165.92	38.98	135.43	50.10	166.27	38.98	134.09	50.14	163.85	35.22	133.86	45.73
160	168.24	39.43	137.07	50.22	167.65	39.43	136.85	50.36	164.36	35.37	135.11	45.91

CUADRO (6.25). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ventana deslizante en función de la cantidad de escenarios para un tamaño de ventana de 48 períodos.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	172.20	40.48	138.62	50.92	171.43	40.02	138.06	51.65	168.29	36.94	137.64	48.29
20	172.69	39.99	139.97	51.06	172.00	40.85	140.21	52.20	168.30	37.22	138.64	47.46
30	173.14	40.66	140.51	52.00	173.64	39.38	141.00	51.69	169.03	37.53	139.34	47.88
40	171.43	39.92	139.18	51.14	172.00	39.02	137.98	50.91	167.93	36.95	136.59	47.28
50	171.22	40.31	138.61	51.51	171.65	40.19	138.12	51.43	168.04	37.50	137.04	47.35
60	170.56	39.88	138.06	51.08	170.86	39.88	137.86	49.67	166.54	37.11	136.74	47.20
70	171.16	39.87	138.80	50.71	170.81	38.60	138.56	49.60	166.81	35.42	137.81	47.19
80	170.57	39.66	138.30	50.63	171.43	39.36	138.92	49.50	166.77	36.49	137.75	46.48
90	171.47	39.40	138.99	50.37	171.16	38.83	138.14	49.14	167.24	35.00	136.94	47.15
100	170.85	39.11	139.44	50.21	172.85	38.85	139.33	50.01	169.31	34.88	137.88	45.07
110	170.54	38.96	138.87	50.08	171.60	38.87	137.90	50.11	168.96	36.18	137.43	45.81
120	171.44	39.02	139.63	49.60	171.43	39.02	138.74	49.63	168.91	36.25	138.14	45.91
130	170.26	38.87	138.82	49.65	171.10	38.87	138.37	49.47	167.30	36.11	136.69	45.74
140	170.20	38.92	139.00	50.00	171.28	38.63	138.76	49.81	167.47	36.09	136.92	44.94
150	163.97	38.98	134.77	50.10	167.17	38.48	135.57	50.07	164.01	35.13	132.37	44.73
160	166.00	39.42	135.33	49.47	167.26	39.42	135.74	50.35	164.44	34.92	132.36	45.29

no afectando a los tiempos insumidos en la optimización de la relajación lineal, debido a la búsqueda de solución factible al procesar la última ventana.

En el Cuadro [6.27](#) se muestran los tiempos finales de cada ventana de ajuste para el caso de 150 escenarios para la instancia completa utilizando 6 centros de distribución. Se ve que el tiempo de terminación de la última ventana es en el segundo 8658, en tanto que el tiempo de terminación del procesamiento de la heurística en la ventana anterior fue en el segundo 122. La heurística termina finalmente de procesar la instancia en el segundo 8666 pasados 6 segundos de la terminación de la

CUADRO (6.26). Tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con avance temporal para distintos tamaños de ventana para las instancias que presentaron valores anómalos en la Figura 6.23 de las instancias con 6 centros de distribución.

Escen.	Completo						Bs. As., La Pampa, Córdoba, Sta. Fe					
	Ventana 8 p.		Ventana 12 p.		Ventana 16 p.		Ventana 8 p.		Ventana 12 p.		Ventana 16 p.	
	Optim.	Total	Optim.	Total	Optim.	Total	Optim.	Total	Optim.	Total	Optim.	Total
10	7	11	5	7	4	6	7	12	5	9	4	6
20	13	16	9	11	7	8	12	16	9	10	7	9
30	23	27	17	24	13	17	15	20	11	14	8	11
40	36	43	21	29	15	18	21	27	15	22	11	16
50	37	46	27	39	19	23	27	33	19	23	14	28
60	40	47	28	35	21	25	35	40	22	27	18	22
70	58	67	39	47	31	37	41	47	29	35	21	28
80	50	58	30	35	24	32	44	52	26	31	21	26
90	44	51	33	39	26	32	42	50	31	39	24	31
100	47	56	36	45	29	45	49	62	35	46	28	46
110	49	54	34	39	26	34	49	55	34	45	26	36
120	54	67	37	63	29	39	55	65	36	48	29	37
130	61	67	41	58	31	43	61	72	40	47	32	41
140	89	100	58	77	50	73	63	73	43	57	33	50
150	132	8666	63	3863	46	6743	132	5562	60	1334	47	5177
160	122	8056	68	6059	55	3038	102	3123	71	3060	55	2615

última ventana, tiempo utilizado, entre otras tareas, en el registro de los resultados en la base de datos.

En la Figura 6.26 se representan los tiempos de proceso de las ejecuciones realizadas para el conjunto de instancias para las cuales se encontró esos valores anómalos, 6 centros de distribución para las instancias completa y Bs. As., La Pampa, Córdoba y Sta. Fe. Como $R1$ se traza la recta de ajuste lineal a los tiempos de procesamiento en función de la cantidad de escenarios procesados tomando los tres tamaños de ventana, en tanto que como $R2$ se traza la misma recta de ajuste lineal pero tomando, solamente el tamaño de ventana de 8 períodos. Para trazar la recta $R3$ se calcula previamente el error estándar de la medición (σ_{xy}) entre la recta $R2$ y los tiempos de ejecución observados para el tamaño de ventana 8 luego, se obtiene $R3$ tomando la recta $R2$ e incrementándole 5 veces ese error de medición (σ_{xy}). La distancia entre los tiempos observados para 150 y 160 escenarios en estos dos conjuntos de instancias y los tiempos ajustados que se obtendrían de las rectas calculadas son de una magnitud que no se observa en las restantes instancias experimentadas, no pudiendo establecerse la causa de esa variación.

CUADRO (6.27). Tiempos (medidos en segundos desde el inicio de la heurística) de finalización de la fijación de valores en cada ventana para la heurística de ajuste compensado con avance temporal para tamaño 8 períodos para la instancia completo considerando 150 escenarios con 6 centros de distribución.

Período	Tiempo
0	26
8	49
16	76
24	101
32	122
40	8658
Fin	8666

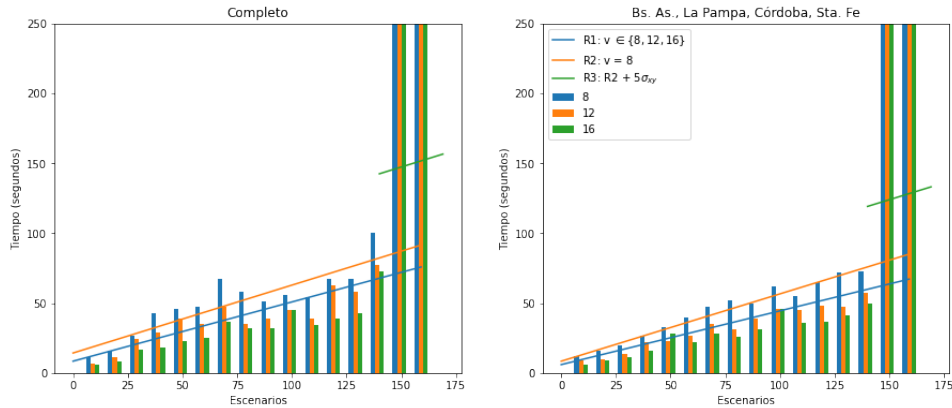


FIGURA (6.26). Evaluación de los valores anómalos en la experimentación de la heurística de ajuste compensado con avance temporal para 6 centros de distribución en las instancia completo y Bs. As., La Pampa, Córdoba, Sta.Fe.

6. Heurística de ajuste por redondeo

Como se ha indicado en la Sección 3 del Capítulo 5, este procedimiento se trata de una heurística que parte de la solución del problema relajado, y, aplica un ajuste por redondeo reiteradamente sobre las variables del envío de camiones desde los centros de fabricación a los centros de distribución (X).

En el Cuadro 6.28 se pueden ver los valores de los parámetros ϵ y δ aplicados a cada uno de los experimentos realizados con esta heurística. Cómo se mencionó en 3 ϵ indica la amplitud fraccionaria para ajustar al entero más próximo y δ

CUADRO (6.28). Valores de ϵ y δ aplicados a cada grupo de experimentos.

$\epsilon = 0.10 \delta = 0.06$	$\epsilon = 0.10 \delta = 0.12$	$\epsilon = 0.10 \delta = 0.18$
$\epsilon = 0.20 \delta = 0.06$	$\epsilon = 0.20 \delta = 0.12$	$\epsilon = 0.30 \delta = 0.06$
$\epsilon = 0.30 \delta = 0.12$	$\epsilon = 0.40 \delta = 0.06$	$\epsilon = 0.50 \delta = 0.06$

el incremento que sufre ϵ cuando no se ha ajustado ningún valor no entero en una revisión. Los valores seleccionados permiten un ajuste fino (para valores de ϵ menores) y un ajuste más grueso a medida que se comienza con valores superiores para ese parámetro.

En las Figuras 6.27, 6.28 y 6.29 se puede ver la métrica que se obtiene por el cociente entre el valor alcanzado por la función objetivo de esta heurística y el valor alcanzado por la heurística de dos fases para los cuatro conjuntos de instancias agrupados por las zonas cubiertas (completo, Bs. As, centro y partida) y por las tres variantes de cantidad de centros de distribución a utilizar (6, 8 y 10). Se ve que en algunos casos el valor alcanzado de la función objetivo iguala al alcanzado por la heurística de dos fases, en tanto que en la mayoría de ellos se encuentra un valor inferior a pesar de que en muchos de esos experimentos no se logra satisfacer la restricción de valores enteros para aquellas variables de decisión que lo requieren y entonces los valores alcanzados no corresponden a una solución factible.

Se manifiestan los valores de la función objetivo expresada en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en los Cuadros 6.29 a 6.41 para los valores de (ϵ, δ) indicados en el Cuadro 6.28.

Recordemos que en la Sección 3 del Capítulo 5 se presentó el modelo (75) para ejemplificar que esta heurística puede fijar valores enteros a las variables que provocan que el problema pase a no tener solución factible dado que, si bien fija el valor al entero más cercano no realiza ninguna consideración teniendo en cuenta las restricciones del modelo.

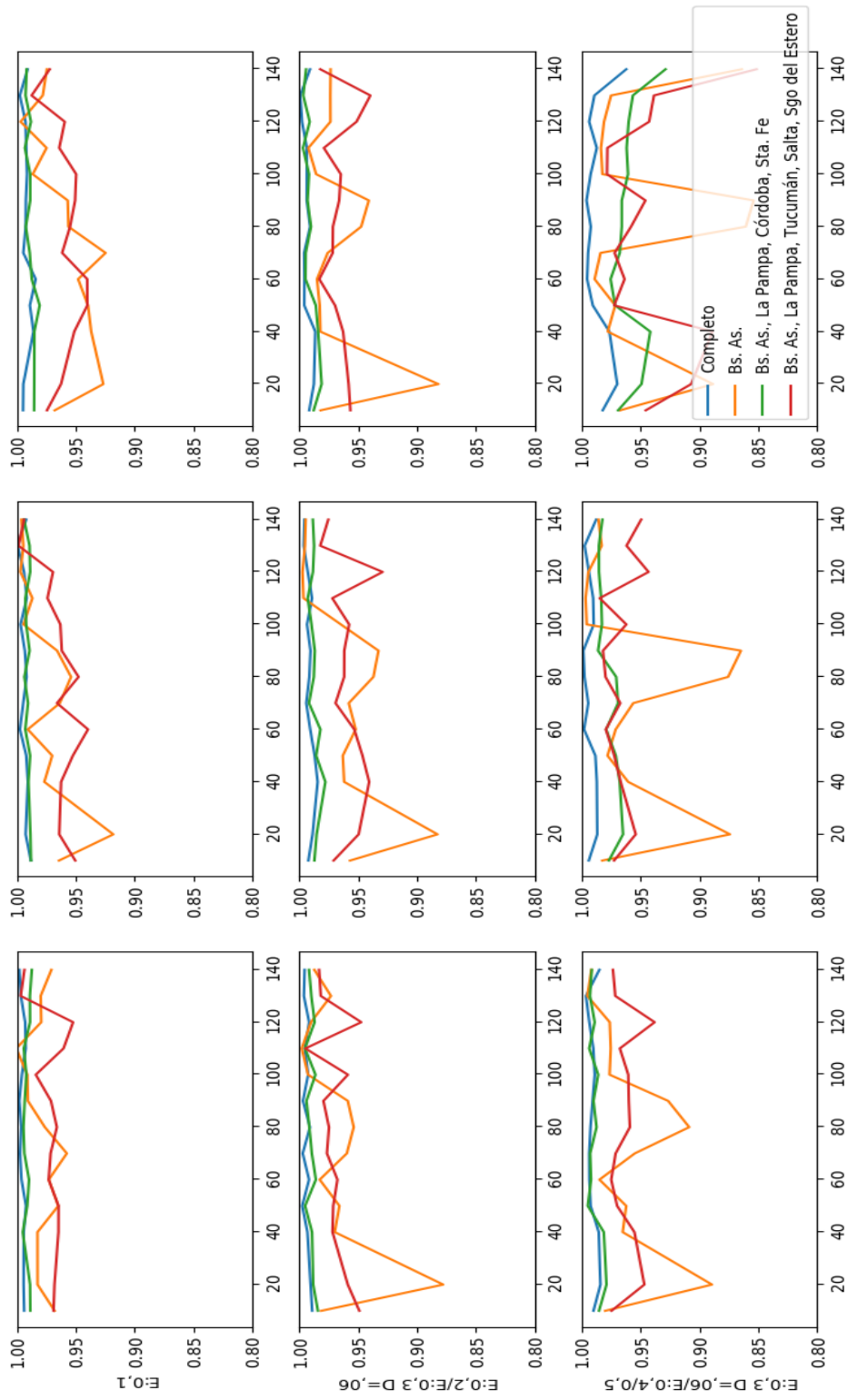


FIGURA (6.27). Valor de la función objetivo al terminar la heurística del ajuste por redondeo para distintos valores de ϵ y δ con la demanda concentrada en 6 centros de distribución.

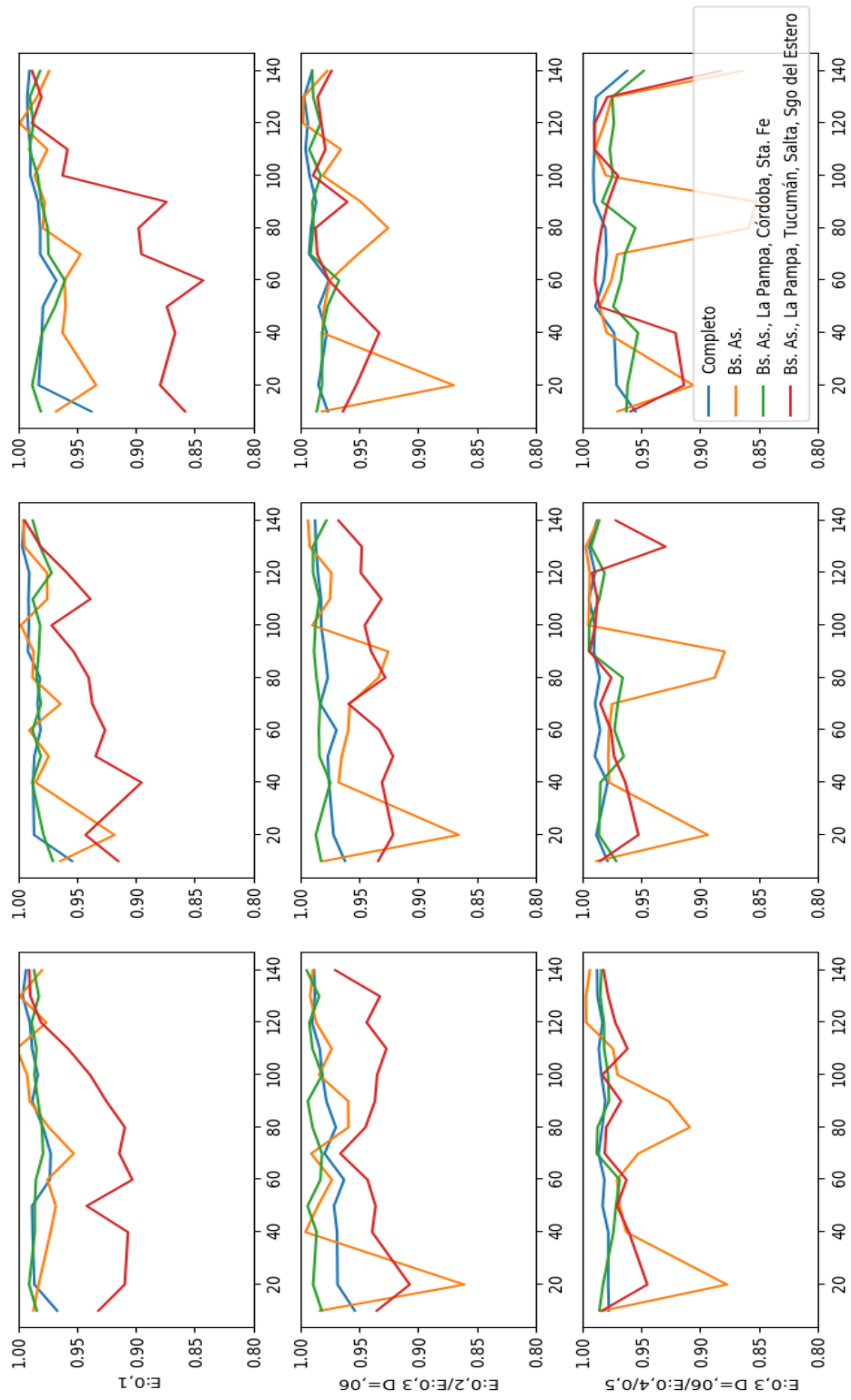


FIGURA (6.28). Valor de la función objetivo al terminar la heurística del ajuste por redondeo para distintos valores de ϵ y δ con la demanda concentrada en 8 centros de distribución.

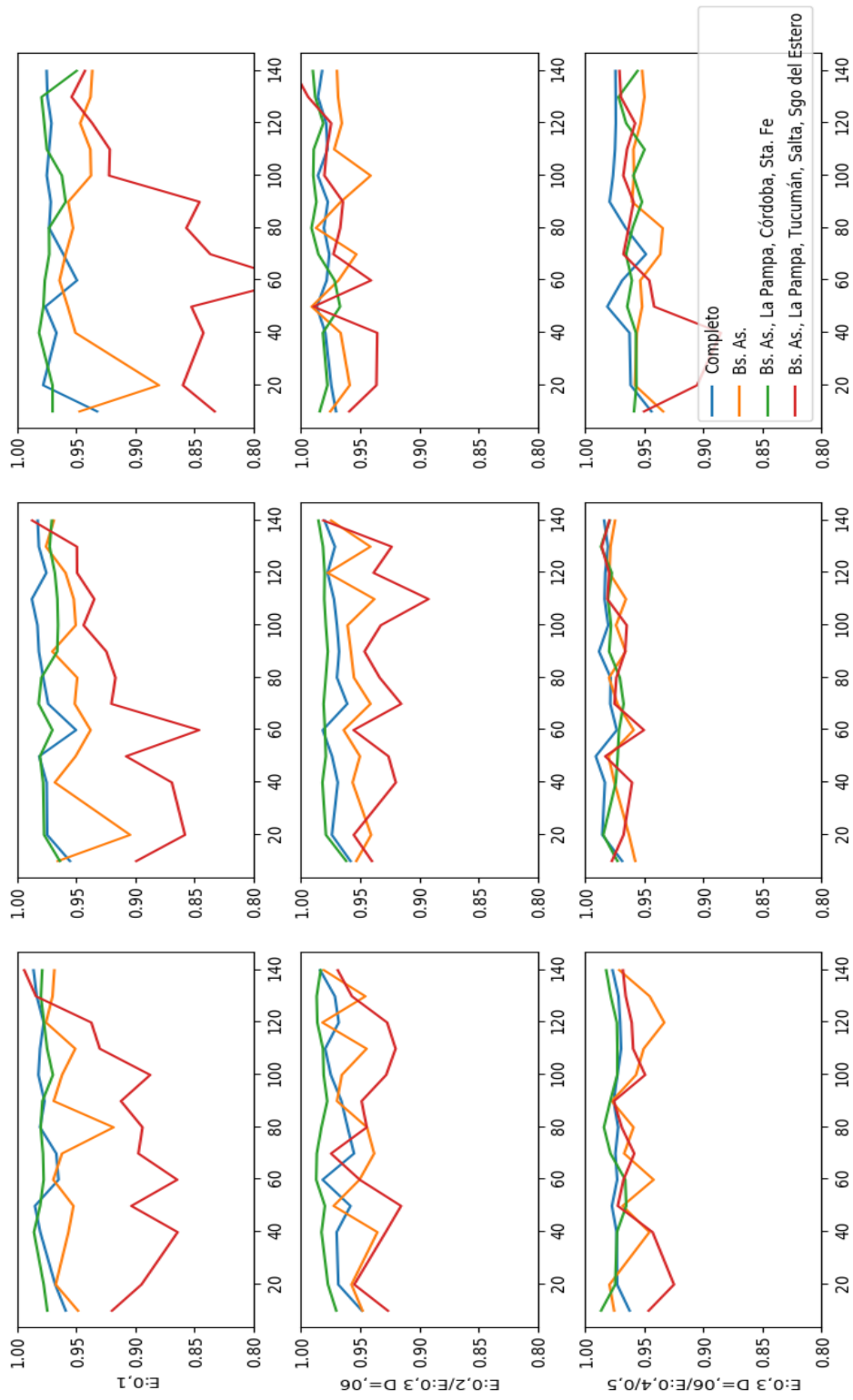


FIGURA (6.29). Valor de la función objetivo al terminar la heurística del ajuste por redondeo para distintos valores de ϵ y δ con la demanda concentrada en 10 centros de distribución.

CUADRO (6.29). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.10$ y $\delta = 0.06$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.23	39.41	137.14	50.30	166.94	40.20	136.69	48.64	162.03	35.86	134.20	44.94
20	172.41	40.26	139.38	50.40	170.85	40.27	139.27	47.59	163.86	36.42	135.83	43.34
30	172.24	39.75	139.41	50.88	171.77	40.75	139.57	48.69	166.00	36.24	137.03	44.41
40	171.02	39.59	138.78	49.64	170.17	39.19	137.18	46.92	164.83	35.58	135.57	41.54
50	171.46	39.22	138.48	49.89	170.69	39.35	137.44	48.97	166.13	35.81	135.36	43.67
60	171.00	39.17	137.60	49.88	166.96	39.27	136.75	46.47	161.76	36.15	134.55	41.35
70	171.53	38.46	138.80	49.70	166.76	38.27	136.50	46.94	162.46	35.53	135.07	42.73
80	170.98	39.06	138.64	49.25	167.96	38.97	136.46	46.54	164.46	33.77	135.24	42.44
90	171.54	39.37	139.00	49.25	169.87	39.36	137.05	47.08	164.31	35.44	135.26	43.11
100	172.38	39.16	139.55	49.75	170.24	39.21	138.45	47.61	166.48	35.07	134.92	41.78
110	171.35	39.46	139.32	48.39	170.42	39.49	137.63	48.36	165.79	34.65	135.05	43.64
120	171.45	38.60	138.57	47.97	170.75	38.47	138.03	49.46	165.38	35.52	135.44	43.88
130	171.49	38.47	138.28	50.06	171.49	39.21	136.83	49.78	165.62	35.18	135.30	45.29
140	171.99	38.11	138.51	49.92	171.29	38.47	137.87	49.87	166.17	35.10	135.60	45.68

CUADRO (6.30). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.10$ y $\delta = 0.12$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.26	39.26	137.06	49.34	164.76	39.26	134.79	47.76	161.42	36.50	132.74	43.94
20	172.11	37.62	139.34	50.18	170.88	37.63	137.55	49.34	165.01	34.05	135.78	41.56
30	172.09	39.29	139.16	50.58	171.52	40.09	138.72	49.39	166.53	36.31	135.94	45.73
40	170.42	39.36	138.11	49.52	170.10	39.70	137.49	46.32	163.92	36.01	134.50	41.77
50	171.41	39.42	138.14	49.25	170.36	39.60	136.73	48.57	165.52	35.74	135.38	43.89
60	171.23	39.89	138.05	48.17	168.32	39.89	137.15	47.67	159.27	34.97	133.53	40.46
70	171.06	38.70	138.36	49.42	168.69	38.72	136.76	48.12	163.61	35.14	135.58	43.82
80	170.21	38.17	138.54	48.31	168.41	39.53	137.10	48.11	164.02	34.90	135.15	43.52
90	170.73	38.39	138.42	48.78	170.49	39.23	136.95	48.50	165.11	35.48	133.52	43.69
100	172.58	39.29	139.57	48.70	171.55	39.42	137.78	49.28	166.61	34.65	134.32	44.43
110	171.20	38.91	139.14	49.08	170.96	38.46	138.08	47.40	166.96	34.70	133.85	43.86
120	171.61	39.29	138.55	48.83	170.85	38.45	135.65	48.35	165.00	34.92	134.16	44.45
130	171.97	39.04	138.32	50.15	171.56	39.06	136.68	49.33	165.32	35.38	134.29	43.70
140	170.97	39.11	139.44	49.94	171.58	39.09	138.02	50.06	165.58	35.12	134.48	45.37

CUADRO (6.31). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.10$ y $\delta = 0.18$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.40	39.41	136.70	50.59	161.94	39.41	136.22	44.79	157.54	35.81	133.59	40.70
20	172.45	37.97	138.89	50.11	170.21	38.27	138.90	46.01	165.59	33.13	134.80	41.65
30	171.10	39.57	138.63	49.28	170.02	39.57	137.77	44.95	165.84	35.94	137.25	41.13
40	169.59	37.75	137.41	48.95	168.80	38.78	136.30	44.85	162.53	35.36	134.97	40.49
50	170.88	38.19	137.00	48.62	169.10	39.01	135.04	45.42	164.65	35.99	134.98	41.22
60	168.94	38.17	137.28	48.20	166.01	38.68	133.34	43.37	159.14	35.95	134.42	36.68
70	171.05	37.14	138.15	49.19	168.30	38.04	135.86	45.97	161.46	35.42	134.34	39.84
80	170.34	38.26	138.36	48.68	168.38	39.17	135.78	45.94	163.18	35.03	134.27	40.68
90	170.58	38.03	138.34	48.21	169.01	38.86	136.66	44.47	163.41	34.99	132.54	39.97
100	171.62	38.98	139.09	48.02	171.33	38.96	138.06	48.80	165.28	34.18	133.86	43.41
110	171.27	38.44	139.20	48.57	170.65	38.46	138.47	48.38	164.50	34.19	135.09	43.25
120	171.40	39.29	138.46	48.33	171.06	39.37	137.82	49.86	164.27	34.46	135.41	43.85
130	171.64	38.40	138.79	49.59	170.82	38.64	137.90	49.30	164.10	34.01	135.23	43.90
140	170.77	38.26	139.12	48.85	170.78	38.23	137.14	49.74	164.31	33.94	131.58	43.32

CUADRO (6.32). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.20$ y $\delta = 0.06$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.41	39.96	136.53	49.27	164.66	40.05	136.34	48.81	160.28	35.85	133.63	45.28
20	171.74	35.97	139.30	49.91	167.73	35.26	139.04	47.46	164.00	36.05	135.80	46.26
30	172.19	40.17	139.29	49.96	169.97	40.08	138.98	49.10	163.87	36.06	136.80	45.40
40	170.84	39.08	137.96	50.00	166.89	40.12	137.22	48.59	163.07	34.80	135.16	44.63
50	172.37	39.26	139.02	50.23	167.78	40.04	138.54	48.67	161.64	36.57	135.27	44.26
60	170.26	39.57	137.08	49.61	165.18	39.19	136.47	48.53	164.59	35.45	135.89	45.46
70	171.49	38.54	138.20	49.96	167.96	39.80	136.88	49.61	160.52	34.66	136.27	46.41
80	170.08	38.16	138.24	49.70	166.40	38.38	137.82	48.34	161.14	34.72	135.63	44.84
90	171.36	38.11	139.08	49.68	168.10	38.13	138.51	47.66	162.48	35.46	135.17	44.84
100	171.82	39.22	138.75	48.48	169.89	38.89	137.78	47.40	165.28	35.20	136.48	43.69
110	171.82	39.35	139.47	50.13	169.61	38.38	138.36	46.80	165.64	34.43	136.02	43.18
120	171.23	39.02	138.32	47.72	170.75	38.89	138.55	47.60	163.81	35.75	136.69	43.42
130	171.41	38.20	138.39	49.30	170.02	38.93	137.04	46.89	163.61	34.30	136.27	44.05
140	171.57	38.76	139.13	49.40	170.41	38.84	139.00	48.84	165.81	35.55	136.26	44.54

CUADRO (6.33). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.20$ y $\delta = 0.12$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.97	38.97	136.95	50.41	166.10	39.92	136.42	48.74	161.92	36.04	132.47	45.94
20	171.45	36.17	138.89	49.43	168.33	35.46	138.72	48.21	164.91	35.42	136.04	46.28
30	170.93	38.99	137.72	49.30	168.11	39.11	137.57	46.40	164.86	35.76	136.76	45.25
40	169.34	38.76	136.39	48.40	168.08	38.99	135.60	48.15	162.92	35.58	135.05	44.21
50	170.53	39.14	137.71	48.94	168.69	39.22	137.13	47.89	164.26	35.73	135.17	44.77
60	170.09	38.34	136.55	48.87	166.30	38.63	136.66	48.01	164.57	35.95	134.87	45.71
70	170.98	38.48	138.53	49.59	168.57	38.48	137.11	49.25	161.48	34.77	135.47	43.58
80	170.16	37.49	137.71	49.04	167.57	37.35	137.36	47.48	162.65	35.13	135.12	44.32
90	170.26	37.07	138.09	48.78	168.36	36.77	137.77	47.82	162.81	35.03	135.10	44.73
100	171.99	38.11	139.23	48.42	170.06	39.11	138.59	47.94	164.40	35.03	136.23	43.91
110	170.78	39.29	139.15	48.98	169.43	38.44	137.53	47.01	164.37	34.19	135.86	41.87
120	171.42	39.30	138.52	46.81	169.89	38.37	138.10	47.85	165.41	35.59	135.84	43.96
130	171.44	39.07	138.07	49.33	169.85	38.95	137.78	47.66	163.60	34.14	135.53	42.50
140	171.60	39.05	138.68	49.01	170.26	39.01	136.66	48.70	165.19	35.33	136.52	45.10

CUADRO (6.34). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para un $\epsilon = 0.20$ y $\delta = 0.18$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.94	38.98	135.26	49.19	167.97	39.53	134.89	49.77	162.93	34.78	132.17	45.88
20	170.97	36.46	138.23	49.71	168.31	36.17	137.53	49.08	164.48	36.40	135.37	45.78
30	171.12	38.96	139.43	50.35	169.20	40.07	137.80	49.19	163.14	35.22	134.23	44.74
40	170.48	39.62	137.90	49.72	167.90	39.81	136.52	49.20	161.69	35.54	133.46	43.88
50	171.79	40.03	137.84	50.00	168.67	39.17	133.55	49.18	163.34	35.66	133.37	45.42
60	170.26	39.63	137.29	49.32	166.74	39.70	132.60	47.72	162.36	35.92	132.25	45.67
70	171.22	38.48	137.92	49.74	167.80	39.59	134.87	48.75	161.50	35.31	133.71	44.40
80	170.53	38.38	138.03	49.42	167.69	37.60	133.83	48.33	161.92	35.37	132.62	44.44
90	170.51	37.40	137.79	49.16	167.64	37.87	136.17	49.31	162.41	35.13	132.20	43.98
100	170.93	39.00	138.86	48.19	170.00	38.96	137.08	49.54	163.15	34.83	133.19	44.14
110	171.14	38.45	139.01	49.75	169.81	39.43	136.18	48.22	164.20	34.83	133.96	43.05
120	171.14	38.48	137.67	47.36	168.79	39.28	135.92	48.09	164.08	34.45	133.42	43.36
130	171.18	38.52	138.46	48.30	169.59	38.56	135.74	48.19	164.20	34.29	133.80	43.13
140	170.85	38.23	138.24	49.03	169.58	38.77	135.54	47.93	164.80	34.89	133.30	45.39

CUADRO (6.35). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.30$ y $\delta = 0.06$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.85	39.98	137.03	49.67	168.62	39.96	136.95	50.31	163.99	36.87	135.55	46.88
20	171.26	36.14	138.29	49.88	170.54	35.64	137.97	49.85	165.00	36.10	135.87	45.35
30	171.56	39.35	138.59	49.74	171.42	39.35	137.60	50.48	165.18	36.44	135.89	45.34
40	169.68	39.58	137.24	49.54	168.41	39.54	136.57	48.28	164.68	35.96	135.00	44.97
50	172.07	39.94	137.76	50.15	170.01	39.82	136.20	49.63	166.44	37.27	133.50	47.84
60	170.94	39.66	138.31	50.40	167.40	39.27	134.27	50.22	164.02	36.12	133.75	45.00
70	171.29	39.20	138.92	49.71	170.21	38.20	138.26	50.62	164.04	35.21	136.08	46.31
80	170.05	37.91	138.04	49.52	170.02	37.03	137.71	50.52	164.49	36.31	136.78	45.90
90	170.81	37.40	138.95	49.00	169.61	37.70	137.96	48.86	164.41	35.35	136.44	45.59
100	172.02	38.94	139.52	48.78	171.76	38.76	137.96	50.17	167.13	34.31	137.71	46.15
110	171.54	39.13	139.71	49.34	171.69	38.08	138.73	49.43	165.30	35.43	137.10	45.91
120	172.27	38.37	138.90	47.93	171.37	39.32	137.23	49.54	165.61	35.15	135.99	45.63
130	171.95	38.22	139.36	47.19	171.57	39.16	137.74	49.55	166.02	35.13	136.44	45.75
140	170.77	38.22	139.48	49.35	170.68	38.36	138.35	49.00	165.53	35.15	137.18	46.24

CUADRO (6.36). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.30$ y $\delta = 0.12$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.58	39.91	136.69	50.61	168.77	40.01	136.88	51.33	162.63	36.88	135.87	46.24
20	170.65	36.45	138.00	49.29	169.43	35.95	138.11	49.45	164.74	36.87	135.42	44.80
30	171.23	39.68	138.29	50.01	170.50	40.31	138.49	50.63	163.51	35.90	135.01	44.11
40	169.54	38.90	136.86	49.15	168.49	38.79	135.48	49.71	163.66	35.18	133.83	45.32
50	171.49	39.11	138.99	50.16	169.76	39.36	135.42	50.46	164.86	36.41	133.26	47.01
60	170.57	39.66	137.94	49.98	168.36	39.08	134.45	49.54	163.10	35.13	132.98	46.28
70	170.91	38.35	138.68	49.69	169.15	38.26	137.76	50.38	163.73	35.72	135.15	45.64
80	170.34	36.36	137.67	48.89	168.69	36.36	137.48	50.15	163.06	35.27	135.81	46.00
90	170.31	36.83	138.53	48.69	168.57	36.83	136.25	49.22	164.15	35.75	135.29	46.11
100	171.21	38.58	138.72	48.57	170.35	38.33	137.32	49.86	164.92	34.89	135.36	44.69
110	170.95	38.47	139.26	48.76	170.06	38.41	137.21	48.57	163.93	34.65	134.81	45.02
120	171.56	38.47	138.59	47.25	169.51	39.29	137.06	49.03	164.18	33.97	134.88	44.98
130	171.46	39.07	138.85	48.79	169.93	39.15	137.15	49.19	163.67	34.29	135.10	44.45
140	169.76	38.94	139.10	48.92	170.28	39.02	137.49	49.43	164.62	35.20	136.09	44.50

CUADRO (6.37). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.30$ y $\delta = 0.18$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.94	39.33	136.94	50.05	166.72	39.75	137.32	49.97	159.75	35.90	135.89	44.27
20	171.83	36.25	137.46	50.08	170.68	35.72	137.46	50.18	165.68	36.18	135.85	45.65
30	171.27	39.23	137.89	48.59	170.49	39.58	137.08	49.91	164.25	35.20	135.45	44.35
40	168.81	38.45	135.46	48.45	168.61	39.05	136.42	49.28	163.63	35.36	134.28	44.47
50	170.88	39.36	136.15	48.93	170.30	39.08	135.33	50.20	166.21	36.82	133.72	47.20
60	169.97	38.50	135.04	48.65	168.65	38.70	133.25	49.35	164.84	36.12	132.19	46.74
70	170.42	37.35	136.29	49.58	169.78	38.25	136.65	49.80	163.87	35.24	136.28	46.13
80	170.64	36.89	136.08	48.73	169.59	36.84	137.00	49.78	165.35	35.86	136.60	45.99
90	170.56	36.21	138.11	48.25	169.10	36.21	137.66	48.11	165.41	35.49	136.15	45.84
100	170.90	38.66	139.15	47.84	171.52	38.77	138.52	49.32	165.64	34.04	135.95	45.71
110	170.53	38.91	138.93	47.05	171.10	37.93	137.54	50.03	165.46	34.63	135.92	45.20
120	171.16	38.77	139.40	47.55	170.66	39.11	137.56	50.08	165.32	34.63	136.23	44.50
130	171.90	38.22	139.15	47.22	171.37	38.56	138.17	50.04	164.24	33.76	134.96	44.80
140	170.63	38.21	139.42	49.12	171.13	38.36	137.76	49.12	165.89	35.29	136.46	43.43

CUADRO (6.38). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.40$ y $\delta = 0.06$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.27	40.01	135.53	50.50	168.95	40.24	134.89	51.42	163.69	36.21	133.96	47.76
20	171.11	35.82	136.02	49.67	171.17	36.61	138.60	49.84	166.86	36.25	136.82	46.87
30	171.45	39.59	137.61	49.64	0	40.31	138.02	49.96	166.14	36.70	136.96	46.86
40	169.82	38.71	134.98	49.75	168.59	39.39	137.01	49.86	165.32	36.28	133.96	46.16
50	170.79	39.76	135.67	50.29	170.90	39.76	134.50	50.59	167.16	36.86	134.25	47.52
60	171.34	39.10	136.15	50.22	169.00	39.36	135.05	50.22	163.16	35.76	133.71	45.45
70	171.03	38.41	135.37	49.49	169.66	39.16	135.26	50.58	164.47	35.93	133.61	46.43
80	171.22	35.03	135.34	49.95	169.07	35.51	134.50	49.92	164.11	36.03	133.95	46.22
90	171.66	34.37	137.99	49.80	170.24	34.94	138.63	50.57	166.24	35.32	135.41	45.66
100	171.36	39.34	138.27	48.65	171.27	39.32	139.57	50.16	166.24	35.51	136.10	45.42
110	170.97	39.31	137.83	49.62	171.53	39.21	137.80	49.86	166.30	35.19	135.90	46.04
120	171.62	39.19	138.09	47.52	170.62	39.17	136.99	50.03	166.32	35.66	135.47	45.87
130	171.65	38.59	137.79	48.31	171.15	39.15	138.23	46.74	165.18	35.49	136.25	45.38
140	170.22	38.70	137.83	47.71	170.29	38.73	137.76	48.91	165.81	35.33	135.67	45.02

CUADRO (6.39). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.40$ y $\delta = 0.12$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	171.27	40.01	135.53	50.50	169.06	40.09	134.91	51.42	163.62	36.25	134.08	47.32
20	170.88	35.82	136.80	50.56	170.32	36.61	137.84	50.71	166.86	36.25	136.62	47.00
30	171.31	39.59	137.54	50.51	0	40.31	138.27	50.76	165.23	36.03	136.36	45.25
40	169.62	38.71	135.05	49.48	168.60	39.39	135.89	50.04	165.08	36.40	134.56	46.79
50	171.87	39.87	135.62	49.85	170.79	39.90	134.70	50.44	166.02	37.19	134.60	47.60
60	171.21	39.10	136.11	50.17	168.81	39.36	134.64	50.19	163.34	36.70	133.60	45.56
70	170.96	38.41	135.99	49.47	168.47	39.09	135.23	50.52	162.98	35.93	134.08	45.40
80	171.22	35.03	134.81	50.04	169.21	35.51	134.59	49.83	164.64	35.84	133.97	46.52
90	171.34	34.37	138.17	49.76	170.19	34.94	137.76	50.40	165.32	35.32	134.69	45.80
100	171.36	39.34	138.41	50.11	171.61	39.32	138.32	49.01	166.58	35.51	136.12	45.61
110	171.78	39.31	138.74	47.57	171.11	39.21	138.92	49.75	165.82	35.19	136.31	45.98
120	171.60	39.19	138.08	47.60	170.67	39.17	137.55	50.20	165.88	35.66	136.29	45.69
130	171.54	39.22	137.77	48.93	169.25	38.51	137.37	49.14	164.44	35.78	135.36	45.18
140	170.87	37.94	137.80	47.74	166.61	37.94	138.41	48.79	164.12	35.33	135.83	44.49

CUADRO (6.40). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.40$ y $\delta = 0.18$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	170.57	39.22	135.00	50.95	169.42	39.73	135.24	50.91	163.80	35.81	132.26	46.23
20	171.22	36.12	136.13	49.99	169.00	36.59	136.46	49.14	164.40	36.46	134.79	45.88
30	171.15	39.42	137.86	49.46	0	40.20	136.67	49.50	163.17	35.11	135.32	45.23
40	169.62	39.82	134.06	49.61	167.46	39.91	135.98	49.28	162.86	35.63	134.15	44.65
50	171.46	40.02	135.35	49.74	169.46	39.40	135.12	49.87	164.44	36.96	133.54	46.30
60	170.64	39.36	135.10	49.54	167.70	40.07	134.16	50.27	163.08	35.78	132.35	45.75
70	170.65	39.28	135.67	48.51	167.58	39.30	134.53	48.93	162.70	36.23	133.68	46.03
80	170.81	35.05	134.94	49.62	167.23	35.37	134.45	48.97	162.62	35.15	133.35	45.66
90	171.26	34.58	137.79	49.39	168.58	35.01	137.71	48.89	163.16	34.71	134.66	45.32
100	172.14	39.42	139.03	49.86	169.69	39.31	137.71	48.17	164.40	35.86	135.52	45.12
110	171.06	39.39	138.51	49.60	169.22	39.27	136.80	48.73	163.56	35.65	135.30	45.39
120	171.64	39.34	137.81	47.85	169.05	39.34	137.04	48.82	163.08	35.04	136.27	44.91
130	170.64	39.13	137.63	47.58	168.66	38.56	137.29	48.69	163.31	35.60	135.11	44.42
140	170.19	38.05	137.75	47.03	168.33	38.56	135.98	47.81	163.67	35.42	135.27	44.50

CUADRO (6.41). Valores de la función objetivo en millones de pesos para la heurística de ajuste por redondeo en función de la cantidad de escenarios para $\epsilon = 0.50$ y $\delta = 0.06$.

Escen.	6 CD				8 CD				10 CD			
	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida	Completo	Bs. As.	Centro	Partida
10	169.23	39.39	134.44	49.09	164.86	39.50	133.69	50.06	159.51	35.32	132.03	46.43
20	168.18	36.41	133.81	47.22	168.17	37.12	135.17	47.81	162.80	36.06	132.95	43.85
30	168.60	39.76	133.28	46.58	169.18	39.83	134.09	48.38	161.85	36.35	131.42	41.86
40	167.98	39.41	131.35	45.74	167.63	39.46	132.57	47.66	161.83	35.58	131.62	42.55
50	171.17	39.49	135.75	50.29	170.84	40.06	135.74	51.24	165.52	35.79	133.14	45.52
60	170.90	39.83	135.63	49.40	168.46	39.28	134.28	50.92	162.40	35.56	132.21	45.23
70	171.06	39.52	135.17	49.73	167.99	38.97	134.40	50.71	159.39	34.59	133.32	46.07
80	170.30	34.43	134.68	48.84	168.22	34.35	133.00	50.34	161.99	34.36	132.47	45.73
90	171.20	33.94	135.17	47.97	170.18	33.87	137.06	49.77	164.74	35.12	131.58	45.33
100	171.81	38.82	135.15	49.48	171.51	38.72	136.77	49.19	165.54	34.95	133.47	45.56
110	170.45	38.79	134.80	49.29	170.72	39.02	136.54	49.99	164.81	34.96	131.62	45.27
120	171.58	38.67	134.56	47.49	170.76	38.67	135.88	49.91	164.80	34.70	133.79	44.84
130	170.23	38.28	133.75	47.14	170.14	38.28	135.75	49.23	164.07	34.45	134.19	44.64
140	165.82	33.92	130.30	42.79	165.90	33.92	132.46	44.42	164.20	34.50	132.41	44.63

En las Figuras [6.30](#), [6.31](#) y [6.32](#) se puede ver la cantidad variables que no se han podido ajustar a valores enteros dado que, de hacerlo el modelo resultante no alcanzaría solución factible para las demandas concentradas en 6, 8 y 10 centros de distribución producidas en los diferentes grupos de localidades que se consideran y en función de la cantidad de escenarios tratados. Se puede ver que en varias instancias más de 15 variables no han podido ajustarse a valores enteros.

En la Figura [6.33](#) se puede observar el impacto que tienen los valores asignados a los parámetros ϵ y δ de esta heurística. El tamaño y color de la burbuja representa la proporción del total de experimentos en los cuales la heurística no pudo lograr satisfacer la restricción de las variables de decisión enteras. Se ve que la mayor cantidad de valores que no cumplen con la restricción se producen con los pares de parámetros $(\epsilon, \delta) \in \{(0.1, 0.06), (0.2, 0.06), (0.3, 0.12), (0.4, 0.18), (0.3, 0.18)\}$.

Los tiempos de ejecución de esta heurística comparados con la heurística de dos fases se pueden observar en las Figuras [6.34](#), [6.35](#) y [6.36](#) para 6, 8 y 10 centros de distribución con los cuatro grupos de instancias. En ellos se puede ver que la heurística de dos fases tiene un tiempo de ejecución inferior o levemente superior al mínimo tiempo de ejecución de esta heurística de ajuste por redondeo.

Los tiempos se encuentran netos del tiempo requerido para obtener la solución inicial de CPLEX. La observación mínimo y máximo corresponde a los tiempos de ejecución de la heurística de ajuste compensado con los parámetros ϵ y δ cuyo

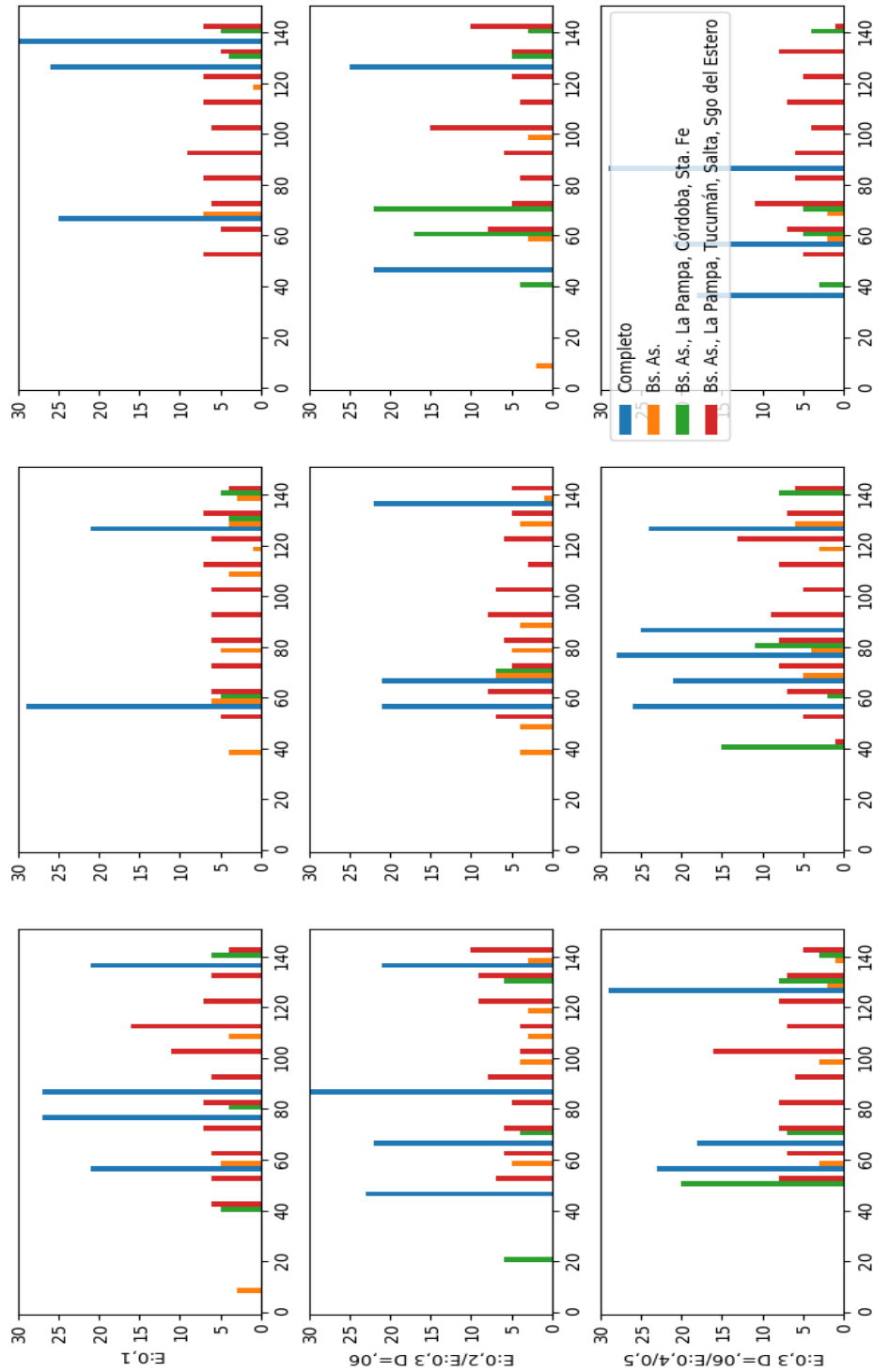


FIGURA (6.30). Cantidad de variables que no se han podido ajustar a valores enteros dado que, de hacerlo el modelo resultante no alcanzaría solución factible para los experimentos con 6 centros de distribución en función de la cantidad de escenarios.

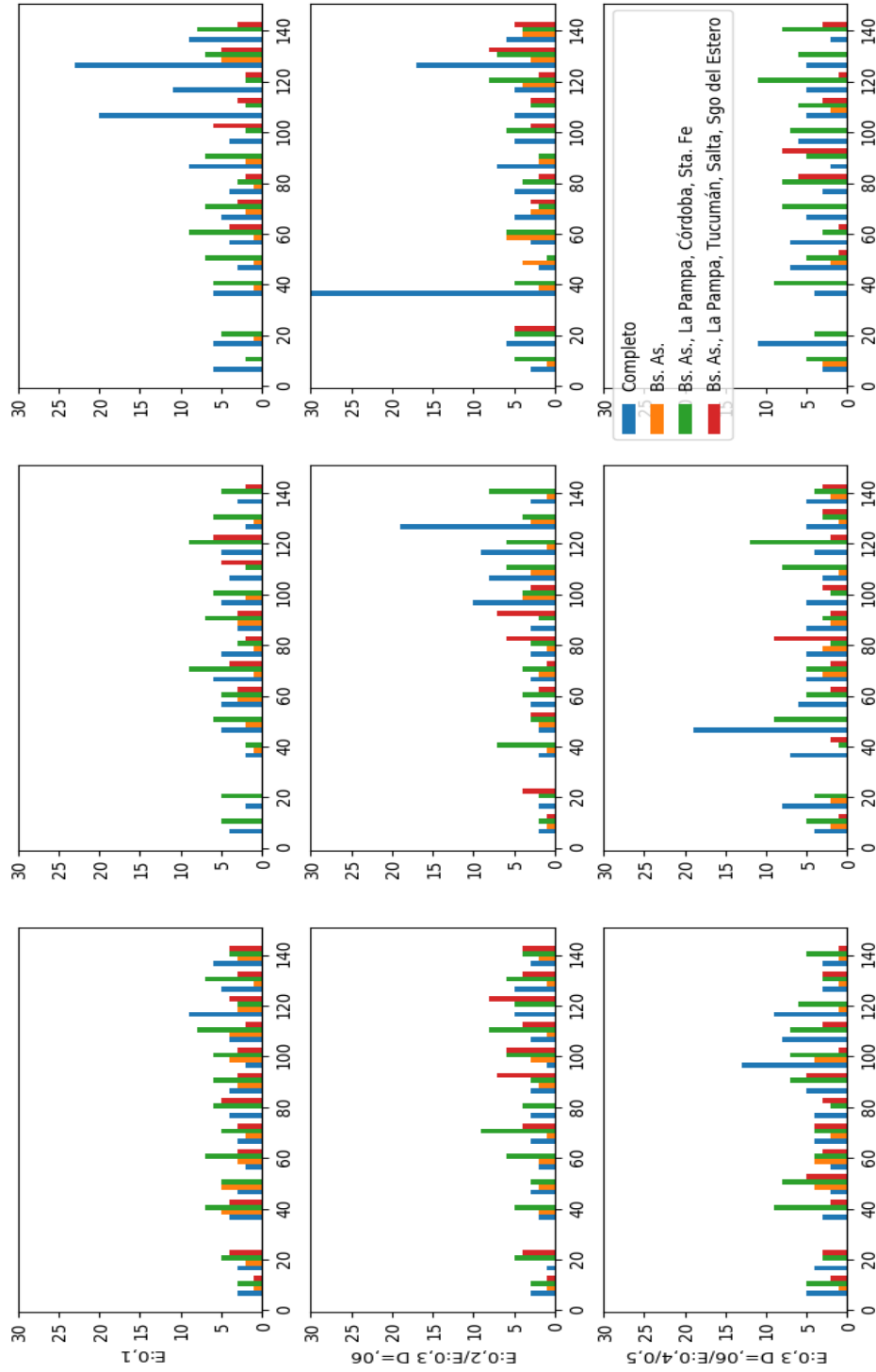


FIGURA (6.31). Cantidad de variables que no se han podido ajustar a valores enteros dado que, de hacerlo el modelo resultante no alcanzaría solución factible para los experimentos con 8 centros de distribución en función de la cantidad de escenarios.

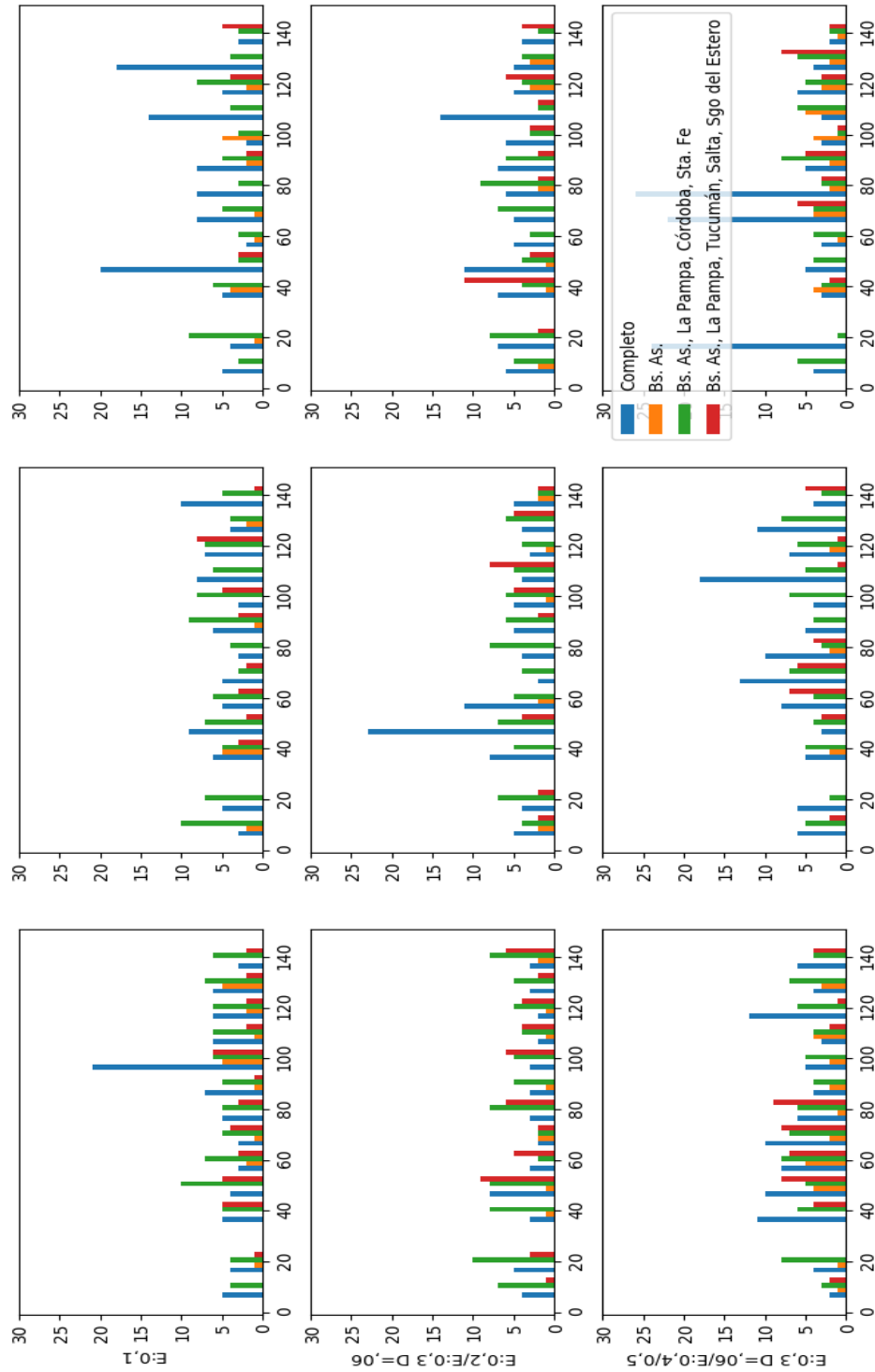


FIGURA (6.32). Cantidad de variables que no se han podido ajustar a valores enteros dado que, de hacerlo el modelo resultante no alcanzaría solución factible para los experimentos con 10 centros de distribución en función de la cantidad de escenarios.

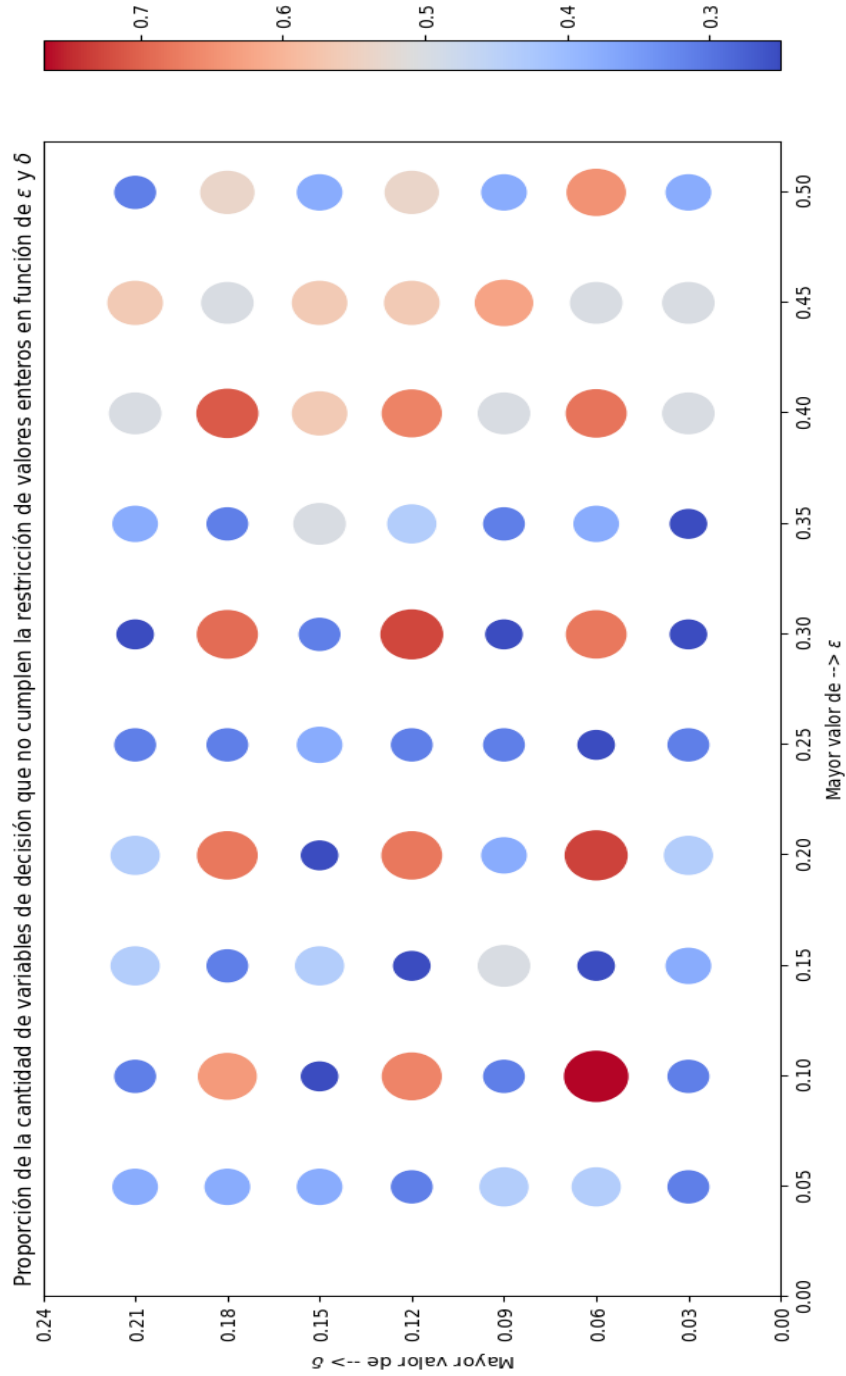


FIGURA (6.33). Proporción de las variables de decisión que no cumplen con la restricción de valores enteros en el conjunto de todas las instancias en función de los valores de ϵ y δ .

tiempo de ejecución fue el “mínimo” y “máximo” de entre todos los experimentos correspondientes a una misma cantidad de escenarios, centro de distribución e instancia.

En el [Apendice N](#) se muestran los parámetros ϵ y δ para los tiempos de ejecución mínimos y máximos para todos los conjuntos de instancias de experimentación, es decir, para todos los experimentos que corresponden a la misma cantidad de centros de distribución, instancia y cantidad de escenarios. Se observa que los menores tiempos se lograron con valores de ϵ elevados ($\epsilon = 0.40$ y $\epsilon = 0.50$), y en cambio los mayores tiempos se obtienen con valores de ϵ menores.

7. Características funcionales de las soluciones halladas

Desde el punto de vista de la gestión de la organización que realiza la producción y distribución del producto es fundamental conocer los períodos y las cantidades de los lotes de producción que se deben elaborar.

En los Cuadros [6.42](#), [6.43](#) y [6.44](#) se puede ver que la heurística de dos fases sugiere producir prácticamente la misma cantidad de lotes de producción en toda la campaña (algunos casos tienen diferencia de un lote) pero con mayor dispersión en el tiempo que las cantidades proporcionadas por CPLEX.

La distribución temporal durante los 48 periodos se muestra en el [Anexo L](#) en donde se puede observar que la solución proporcionada por CPLEX concentra la producción, por ejemplo, para la instancia con 80 escenarios completa con 6 centros de distribución CPLEX sugiere producir 4 lotes en el período 1, 8 en el 7 además de 4 en el período 13 en cambio, la heurística de dos fases propone en su primer fase como en la segunda en ningún período producir más de 2 lotes en un período. El modelo así planteado no está incorporando economías de escala como para establecer una mejora en la concentración de órdenes y pareciera ser que las penalidades por almacenamiento no son sensibles.

El procedimiento de la heurística de ajustar los envíos en más o menos podría influir en el comportamiento verificado.

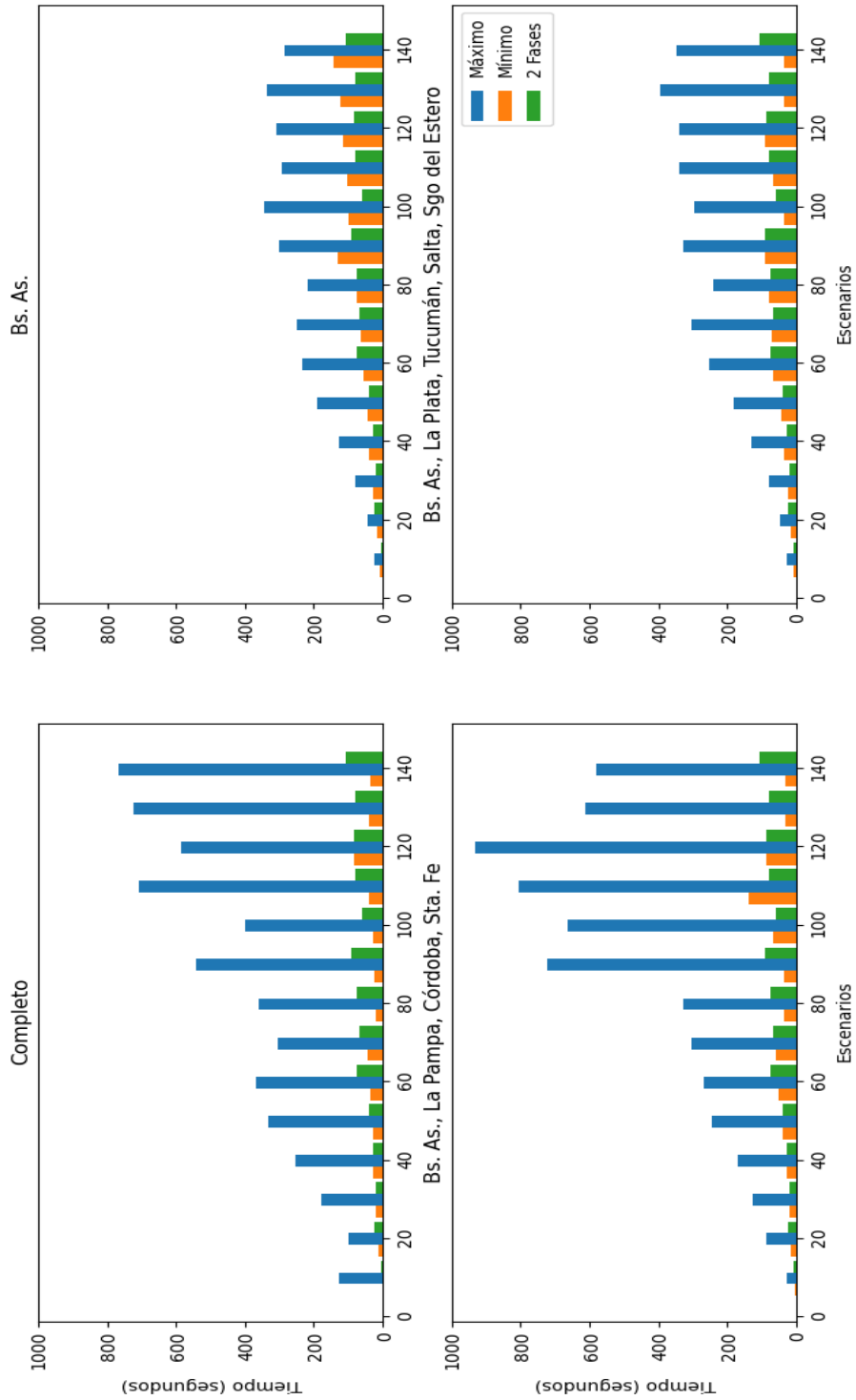


FIGURA (6.34). Comparación del tiempo mínimo y máximo contra el tiempo de proceso de la heurística de dos fases para las instancias de 6 centros de distribución en función de la cantidad de escenarios contemplados. No se incluye el tiempo de CPLEX inicial.

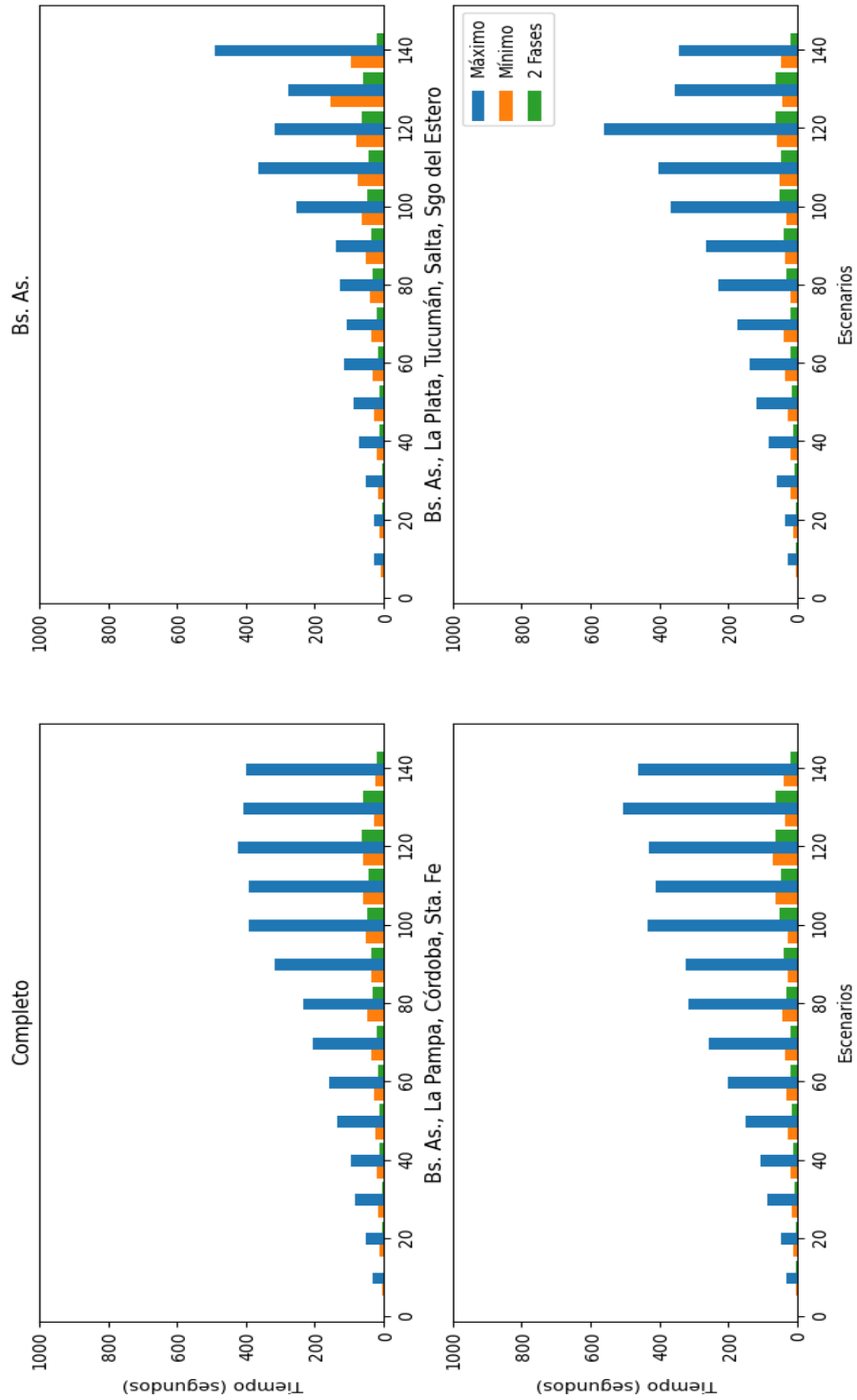


FIGURA (6.35). Comparación del tiempo mínimo y máximo contra el tiempo de proceso de la heurística de dos fases para las instancias de 8 centros de distribución en función de la cantidad de escenarios contemplados. No se incluye el tiempo de CPLEX inicial.

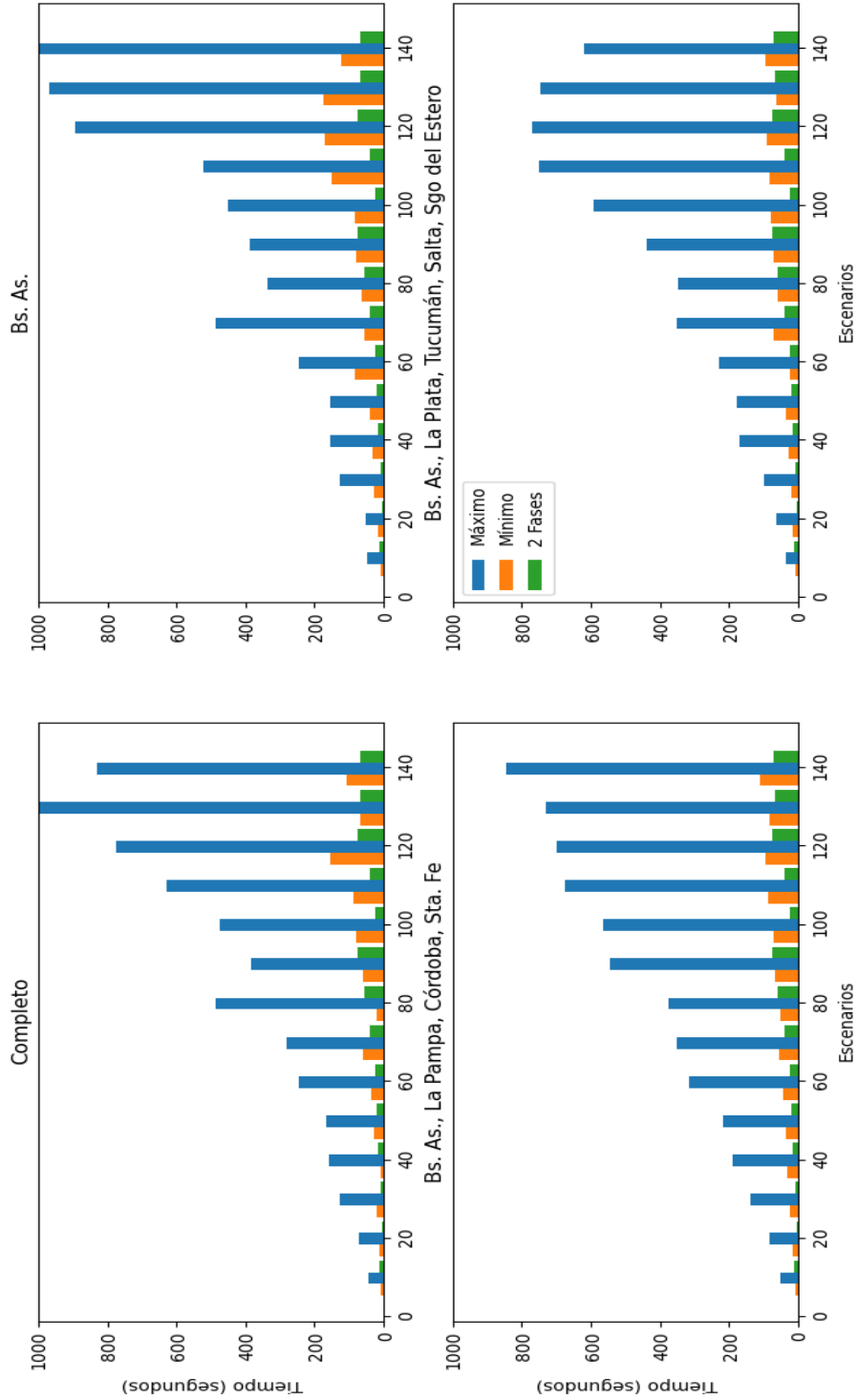


FIGURA (6.36). Comparación del tiempo mínimo y máximo contra el tiempo de proceso de la heurística de dos fases para las instancias de 10 centros de distribución en función de la cantidad de escenarios contemplados. No se incluye el tiempo de CPLEX inicial.

CUADRO (6.42). Total de lotes de producción sugeridos por la solución obtenida mediante CPLEX con tiempo límite de 20 minutos y por la heurística de dos fases en la totalidad de los períodos considerados para las instancias con 6 centros de distribución en cada segmentación de demanda.

Esc.	Completo		Bs. As.		Centro		Partido	
	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases
10	46	46	10	11	39	40	12	13
20	45	46	9	9	39	39	12	12
30	45	46	9	10	39	40	12	13
40	45	46	9	10	38	39	12	13
50	45	46	9	10	38	39	12	13
60	46	46	9	10	40	40	12	13
70	46	46	9	10	40	40	12	13
80	47	46	9	10	40	40	12	13
90	47	47	9	10	40	40	13	13
100	46	47	9	10	41	41	12	13
110	46	47	9	10	40	41	13	13
120	48	47	9	10	42	41	12	13
130	48	48	9	10	42	41	12	13
140	47	48	9	10	41	41	12	13
150	46	46	9	10	38	39	12	13
160	46	46	10	10	39	39	13	13

Para cada grupo de instancias se obtienen diferentes planes de producción dependiendo de la cantidad de escenarios que se incluyen en la optimización con lo que se puede preguntar ¿Cuál de ellos se debe llevar a la práctica?.

Una respuesta sería la “de mayor cantidad de escenarios”, no obstante se puede buscar aquel plan de producción que se encuentre a la menor distancia (modelo [76](#)) de los planes propuestos por cada optimización contemplando diferente cantidad de escenarios produciendo en toda la campaña una cantidad de lotes de producción igual o superior al promedio de los lotes de producción que se sugieren para cada uno de los escenarios. El armado de un plan de producción de mínima distancia a los planes sugeridos podría ser una solución de compromiso flexible ante las realizaciones de la demanda que se vayan presentando durante todo el ciclo de 48 períodos.

Se debe tener en cuenta que tomar el plan de producción de mínima distancia obligaría a realizar una optimización del modelo fijando ese plan para determinar los valores del resto de las variables y verificar que no genera una solución no factible.

CUADRO (6.43). Total de lotes de producción sugeridos por la solución obtenida mediante CPLEX con tiempo límite de 20 minutos y por la heurística de dos fases en la totalidad de los períodos considerados para las instancias con 8 centros de distribución en cada segmentación de demanda.

Esc.	Completo		Bs. As.		Centro		Partido	
	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases
10	45	46	10	11	40	40	12	13
20	45	46	9	9	40	40	12	12
30	46	46	9	10	39	40	12	13
40	46	46	9	10	40	40	12	13
50	46	47	9	10	39	40	12	13
60	46	47	9	10	39	40	12	13
70	46	48	9	10	40	40	12	13
80	47	47	9	10	40	40	12	13
90	47	48	9	10	40	41	12	13
100	49	48	9	10	40	41	12	13
110	46	49	9	10	40	41	12	13
120	46	49	9	10	40	42	12	13
130	48	49	9	10	42	42	13	13
140	48	49	9	10	42	42	12	13
150	48	47	9	10	40	40	13	13
160	47	47	10	10	42	40	13	13

Esta verificación se ha realizado para 160 escenarios con las cuatro zonas geográficas cuya demanda se busca satisfacer generando en todos los casos solución factible. Una comparación de los valores de la función objetivo se puede ver en el Cuadro [6.45](#) y se comentan más adelante.

$$\begin{aligned}
 (76) \quad & \min \sum_{j=1}^E \left(\sum_{i=1}^N |x_i - p_{ij}| \right), \\
 \text{sujeto a} \quad & \sum_{i=1}^N x_i \geq \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^E p_{ij} \right)}{E} \\
 & x_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \\
 & x_i \in \mathbb{Z}
 \end{aligned}$$

En donde:

CUADRO (6.44). Total de lotes de producción sugeridos por la solución obtenida mediante CPLEX con tiempo límite de 20 minutos y por la heurística de dos fases en la totalidad de los períodos considerados para las instancias con 10 centros de distribución en cada segmentación de demanda.

Esc.	Completo		Bs. As.		Centro		Partido	
	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases	CPLEX	2 Fases
10	47	48	10	11	40	40	12	13
20	46	48	9	10	40	40	12	13
30	48	47	10	10	40	40	12	13
40	49	47	9	10	40	40	12	13
50	47	48	10	10	40	40	13	13
60	48	48	10	10	39	40	13	13
70	47	48	10	10	40	40	12	13
80	47	48	9	10	40	40	13	13
90	47	49	9	10	41	41	13	13
100	49	49	10	10	41	42	13	13
110	49	49	10	10	41	42	13	13
120	49	49	9	10	41	42	13	13
130	51	50	10	10	41	42	12	14
140	50	50	10	10	41	42	13	14
150	47	48	10	10	42	40	15	14
160	48	48	10	11	41	40	13	14

- E : cantidad de optimizaciones realizadas con diferentes cantidades de escenarios,
- N : cantidad de períodos a planificar,
- $\{p_{ij}\}$: cantidad de lotes de producción sugeridos a realizar en el período i en la solución obtenida a partir de la optimización de orden j del conjunto de todas las optimizaciones realizada para los distintos escenarios,
- $\{x_i\}$: variables de decisión enteras que indican la cantidad de lotes de producción a realizar en cada período.

La función objetivo busca minimizar la suma de todas las distancias expresadas por su diferencia en valor absoluto, entre cada variable de decisión de un período y la cantidad de lotes de producción determinados para ese período por todas las optimizaciones realizadas.

La restricción asegura que el plan de producción resultante determine realizar al menos la cantidad promedio de lotes de producción determinada por las diferentes optimizaciones.

Desde la visión del negocio la decisión de mayor importancia es establecer el plan de producción para asegurar el abastecimiento de las materias primas con la anticipación suficiente que permita su adecuada ejecución para cubrir satisfactoriamente la demanda que se vaya materializando en las diferentes regiones.

En el Anexo [M](#) se puede ver el resultado de la ejecución del modelo [\(76\)](#) para las instancias con diferentes zonas de demanda a satisfacer y para las tres alternativas de cantidad de centros de distribución utilizados. Se puede ver qué, en aquellos períodos en los cuales las ejecuciones con diferente cantidad de escenarios sugieren mayoritariamente producir, la solución resultante del modelo de mínima distancia también lo hizo. Una situación llamativa se presenta en los períodos 19 a 22 de la instancia partida con 6 centros de distribución, en ejecuciones con diferente cantidad de instancias se fue decidiendo la realización de un lote en alguno de los períodos mencionados, no obstante, en ningún período el modelo de mínima distancia decide realizar un lote de producción (ver Cuadro [M.3](#)). Esto se produce dado que el modelo de mínima distancia solo observa lo decidido en un período sin analizar lo decidido en períodos cercanos.

En el Cuadro [6.45](#) se pueden observar los valores de la función objetivo utilizando 160 escenarios al optimizar el modelo de distribución / fabricación multiperíodo con la demanda concentrada en los centros de distribución presentado en el Capítulo [4](#) (modelo CD) fijando el plan de producción con el resultado de la optimización del modelo que obtiene el plan de producción de mínima distancia (modelo [\(76\)](#)), con el valor de la función objetivo cuando el plan de producción es determinado por CPLEX limitando el tiempo de ejecución a 20 minutos y con el óptimo que se obtiene cuando el plan es obtenido por la heurística de dos fases (Sección [1](#) del Capítulo [5](#)) en similares instancias. Las diferencias son inferiores al 1 % en todos los casos con excepción de las instancias que toman la demanda de la zona partida (Buenos Aires, La Pampa, Tucumán, Salta y Santiago del Estero) para 6 y 10 centros de distribución. Una mención especial para la diferencia entre el óptimo obtenido

con la utilización del plan de producción de mínima distancia y el propuesto por CPLEX en la instancia con 6 centros de distribución que cubre la demanda de la zona centro (Buenos Aires, La Pampa, Córdoba y Santa Fé), la cual es levemente superior al 1 %.

Una observación global de las diferencias entre el valor óptimo obtenido usando el plan de producción de mínima distancia y el valor obtenido cuando el plan de producción lo determina CPLEX muestra que en siete casos sería favorable utilizar el plan de producción de mínima distancia y en los restantes cinco casos no. En cambio al realizar la comparación contra los resultados de la heurística de dos fases, solamente en dos casos resulta favorable utilizar el plan de producción de mínima distancia.

En términos generales se podría decir que, es indistinto utilizar el plan de producción de mínima distancia o no dado que las diferencias resultantes de las evaluaciones de la función objetivo entre ellos son menores.

CUADRO (6.45). Comparación entre los valores de la función objetivo para las instancias de 160 escenarios entre la optimización del modelo de distribución / fabricación multiperíodo con la demanda concentrada en los centros de distribución presentado en el Capítulo 4 (modelo CD) con el plan de producción de mínima distancia, con el definido por CPLEX con 20 minutos de tiempo de ejecución y con la heurística de dos fases.

C.D.	Región geográfica	Mínima Distancia		CPLEX		Heurística de dos fases		
		Función objetivo	Función objetivo	Diferencia	%	Función objetivo	Diferencia	%
6	Buenos Aires	\$ 39.597.175,63	\$ 39.538.501,97	\$ 58.673,66	0,15 %	\$ 39.614.877,02	-\$ 17.701,39	-0,04 %
	Centro	\$ 137.124.817,27	\$ 135.723.646,91	\$ 1.401.170,37	1,02 %	\$ 138.028.254,49	-\$ 903.437,22	-0,66 %
	Partida	\$ 48.780.365,02	\$ 50.087.246,22	-\$ 1.306.881,19	-2,68 %	\$ 50.404.328,97	-\$ 1.623.963,95	-3,33 %
	Completo	\$ 168.974.449,09	\$ 169.430.817,71	-\$ 456.368,62	-0,27 %	\$ 169.624.378,41	-\$ 649.929,32	-0,38 %
8	Buenos Aires	\$ 39.593.066,31	\$ 39.559.867,96	\$ 33.198,35	0,08 %	\$ 39.615.897,53	-\$ 22.831,22	-0,06 %
	Centro	\$ 136.443.340,01	\$ 135.684.561,51	\$ 758.778,50	0,56 %	\$ 137.540.701,59	-\$ 1.097.361,58	-0,80 %
	Partida	\$ 50.492.004,22	\$ 50.382.861,66	\$ 109.142,56	0,22 %	\$ 50.446.339,01	\$ 45.665,21	0,09 %
	Completo	\$ 168.478.941,42	\$ 169.301.342,77	-\$ 822.401,36	-0,49 %	\$ 169.705.550,80	-\$ 1.226.609,38	-0,73 %
10	Buenos Aires	\$ 35.917.548,76	\$ 36.062.298,15	-\$ 144.749,39	-0,40 %	\$ 35.736.919,14	\$ 180.629,61	0,50 %
	Centro	\$ 134.693.600,30	\$ 133.921.358,52	\$ 772.241,79	0,57 %	\$ 135.513.977,55	-\$ 820.377,25	-0,61 %
	Partida	\$ 45.465.414,14	\$ 46.355.570,00	-\$ 890.155,86	-1,96 %	\$ 46.201.419,88	-\$ 736.005,74	-1,62 %
	Completo	\$ 163.951.513,40	\$ 163.375.877,84	\$ 575.635,56	0,35 %	\$ 165.198.166,12	-\$ 1.246.652,72	-0,76 %

8. Discusión

Se realizaron experimentos para evaluar el rendimiento de tres heurísticas entre sí y contra los resultados del modelo entero que se obtienen mediante CPLEX.

Se han expresado los resultados obtenidos en las experimentaciones computacionales realizadas, exponiendo el valor alcanzado por la función objetivo y el tiempo de ejecución consumido.

Adicionalmente, se han realizado experimentos variando los parámetros propios de cada una de las heurísticas.

8.1. Heurística de dos fases. Los experimentos realizados con la heurística de dos fases (ver Sección 4) han abarcado las variantes de instancias descriptas. De su observación se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- En una importante cantidad de instancias se obtiene un mejor valor de la función objetivo en, aproximadamente un 10% del tiempo fijado como límite para la búsqueda de la solución mediante CPLEX.
- En aquellas instancias en que el valor de la función objetivo alcanzado por CPLEX supera al valor de la función objetivo de la heurística de dos fases, ambos se encuentran bastante cercanos, con una diferencia inferior al 1%.
- CPLEX obtiene un mejor resultado cuando la demanda cubierta corresponde a las localidades de la provincia de Buenos Aires quedando centros de distribución sin utilizar.
- En la mayoría de las instancias la cantidad de intentos de mejora que son necesarios para alcanzar el valor definitivo de la función objetivo es inferior a 10.
- Los planes de producción que se sugieren tienen la misma cantidad total de lotes de producción que la solución entera hallada con CPLEX o con una leve diferencia en más o menos.
- Los lotes de producción sugeridos se encuentran distribuidos en mayor cantidad de períodos que la solución CPLEX que determina realizar más lotes de producción en determinados períodos.

8.2. Heurística de ajuste compensado con avance temporal. Los experimentos realizados con la heurística de ajuste compensado con avance temporal (ver Sección 5) abarcaron las instancias con las variantes generales descriptas y las variantes particulares para la evaluación del parámetro de funcionamiento de la heurística correspondiente a la cantidad de períodos de la ventana. De su observación se pueden obtener las siguientes conclusiones.

- En ninguna de las instancias probadas el valor de la función objetivo al concluir la ejecución de la heurística superó al valor de la función objetivo alcanzado por la heurística de dos fases.
- De la observación del valor alcanzado por la función objetivo para distintos tamaños de ventana se puede ver que los mejores valores se encuentran con tamaños entre el 15 % y el 50 % de la cantidad de períodos.
- En una importante cantidad de casos el tiempo de proceso fue inferior al necesario para la heurística de dos fases.

8.3. Heurística de ajuste por redondeo. Los experimentos realizados con la heurística de ajuste por redondeo (ver Sección 6 del capítulo anterior) han abarcado las variantes generales descriptas y las variantes particulares para la evaluación de los parámetros de funcionamiento de la heurística, valor ϵ llamado “límite de redondeo” y el valor δ llamado “ajuste al límite de redondeo”. De su observación se pueden extraer las siguientes elementos.

- En la mayoría de los casos no llega a una solución factible, es decir que, al terminar la heurística quedan variables con valores fraccionarios.
- Solo en unos pocos casos fue superado el valor de la función objetivo obtenida mediante la heurística de dos fases.
- Los valores del límite de redondeo ϵ superiores a 0.4 no parecen ser prácticos.

8.4. Características funcionales. La solución hallada aporta a la gestión de la producción y distribución una planificación que permite establecer adecuadamente la cantidad de las materias primas requeridas. El plan de producción de

mínima distancia no difiere en demasía de la solución encontrada utilizando la mayor cantidad de escenarios con los cuales se ha realizado la experimentación.

Durante el transcurso de los 48 períodos y mediante un adecuado sistema de monitoreo anticipatorio se podrá direccionar la producción a los centros de distribución que requieran mayor cantidad de producto.

Comparando los resultados de la heurística de ajuste compensando con avance temporal con la heurística de dos fases se puede observar que cuando la optimización se realiza contemplando todos los períodos generalmente, se obtienen soluciones de mejor calidad que observando solamente algunos períodos.

Conclusiones y trabajos futuros

Se ha podido ver en las experimentaciones realizadas en el capítulo anterior que la heurística de dos fases presenta varias ventajas para resolver problemas como el planteado en esta tesis.

- El tiempo de procesamiento requerido para obtener una solución es inferior al 10 % del tiempo máximo asignado a CPLEX.
- El valor de la función objetivo de la solución obtenida es cercana o superior a la obtenida por CPLEX.

Los planes de producción sugeridos contemplan cantidades de lotes de producción similares para toda la campaña pero distribuidos en una mayor cantidad de períodos.

Esta característica se puede presentar por la secuencia en la cual se le asignan valores enteros a las variables, comenzando por los viajes de camiones al centro de distribución (X) para luego asignarle valor a la cantidad de lotes de producción a realizar en cada período.

En función de las conclusiones halladas, se puede afirmar que la heurística de dos fases es bastante adecuada para el tratamiento de problemas con variados escenarios de demanda que evolucionan en forma temporal.

Muchas son las inquietudes que han quedado pendientes en el desarrollo de esta tesis, por ejemplo aumentar considerablemente los escenarios a tratar, realizar una evaluación “más inteligente” de las soluciones obtenidas, optimizar también la distribución al punto de venta, integrar la optimización en los pasos del proceso de difusión, solamente por nombrar algunas de ellas.

Ante esas inquietudes no resueltas se pueden plantear las siguientes líneas de trabajo.

1. Clusters de escenarios

La cantidad de escenarios es un factor que influye fuertemente en el tiempo de procesamiento por lo cual una preselección de los escenarios a utilizar conformando grupos que sean representados por un escenario resumen podría ser una alternativa para poder incrementar la cantidad de escenarios participantes.

Las técnicas de clustering permiten la creación de grupos de individuos que se encuentran cercanos a uno representativo, identificado como el individuo central del grupo. Con este concepto, se pueden formar grupos de escenarios que sean representados por un escenario central que concentra la probabilidad de ocurrencia de los escenarios que conforman el grupo. A continuación, proceder a la optimización y ejecución de las heurísticas definidas.

Este mecanismo permitiría incrementar fuertemente la cantidad de escenarios a tratar.

2. Extensión del alcance

La presente tesis se ha focalizado en la búsqueda de alternativas tomando como caso de estudio el modelo reducido con la demanda centrada en los centros de distribución (Capítulo 4). Una extensión natural del trabajo sería escalar las heurísticas al modelo que contempla la distribución hacia los centros de consumo (Capítulo 3).

En este sentido se debería mejorar la fase 1 de la heurística de dos fases (Sección 1.1 del Capítulo 5) realizando en una primera instancia el ajuste para los envíos de los centros de distribución a los centros de consumo para posteriormente, realizar el ajuste para los envíos de los centros de fabricación a los centros de distribución.

En cuanto a la fase 2 (Sección 1.2 del Capítulo 5) la evaluación de la mejora guiada por penalidad en el caso de ajustar un envío del centro de fabricación al

centro de distribución debe recalcular los envíos a los centros de consumo que se abastecen desde el centro que ajusta sus recepciones.

3. Calidad de la solución

Otra inquietud que surge es ¿se requiere aumentar la cantidad de escenarios?, ¿aumentar la cantidad de escenarios mejoraría la calidad de la solución hallada?

Una respuesta a estas preguntas se puede obtener a través de la elaboración de un gradiente de calidad de la solución en función de la cantidad de escenarios considerados.

Una extensión de la presente tesis se puede orientar a la elaboración de mecanismos que permitan evaluar la calidad de la solución en aspectos que vayan más allá de la simple observación del valor de la función objetivo.

Esta línea requiere el incremento de la funcionalidad que se encuentra implementada en el módulo “Resultado” (Sección I del Capítulo E) incorporando el cálculo de las métricas que indicarían la calidad de la solución y la evolución de las mismas, junto con los criterios de decisión que indiquen si se debe continuar o detener el incremento de escenarios a considerar.

4. Restricciones robustas

Se pueden plantear restricciones que son transversales a los períodos y centros de consumo como ser:

- la cantidad de períodos en con demanda superior al stock existente en un centro de consumo no debe superar una determinada cantidad, y/o
- la cantidad de centros de consumo que presenten quiebre de stock en alguno de sus períodos no puede ser superior a un determinado valor, y/o
- la demanda insatisfecha en los centros de consumo no puede superar una proporción establecida de la demanda total en la campaña, y/o
- la probabilidad de tener mas de s quiebres de stock en la campaña sea inferior a α .

Para incorporar una o varias de estas restricciones es necesario refinar las restricciones del modelo y verificar el comportamiento de las heurísticas descriptas.

5. Ampliar la oferta de productos

Esta tesis ha trabajado sobre la base de una organización monoproducción. Una extensión de este trabajo es la optimización de la producción en forma simultánea con la optimización del surtido de productos en los centros de consumo con los patrones de comportamiento de la demanda similares al planteado en esta tesis, u otros comportamientos de demanda diferentes.

Un problema de optimización de surtido consiste en establecer un conjunto de productos que se deben ofrecer en un punto de venta para maximizar el resultado obtenido en él ([57]). Si llevamos el concepto a una cadena, la selección realizada en cada punto de venta se puede agregar en una selección total en la cadena de los productos que se deben producir y comercializar.

Buscar alguna respuesta a los planteos realizados puede ser la base para futuros trabajos de investigación.

Apéndice A

Notación del modelo demanda en centros de consumo (modelo CC)

En este anexo se presenta una tabla resumen de los parámetros y variables de decisión correspondientes al modelo con la demanda en los centros de consumos que se describe en el Capítulo [3](#).

CUADRO (A.1). Símbolos modelo CC.

Conjuntos	
Símbolo	Descripción
$P = \{1, \dots, N\}$	Períodos del horizonte de planeamiento
$CF = \{cf_f\}_{f=1}^F$	Centros de fabricación
$CD = \{cd_i\}_{i=1}^I$	Centros de distribución
$CC = \{cc_j\}_{j=1}^J$	Centros de consumo
Parámetros	
Símbolo	Descripción
$csf_f := csf(f)$	Costo de fabricación unitario en f .
$tl_f := tl(f)$	Tamaño del lote de fabricación en f .
$cp_f := cp(f)$	Capacidad máxima de producción en f .
$cpf_f := cpf(f)$	Capacidad de almacenaje en el centro de producción f .
$if_f := if(f)$	Saldo al inicio del período de planeamiento en f .
$cap_i := cap(i)$	Capacidad de almacenaje en el centro de distribución i .
$cfa_i := cfa(i)$	Costo de contratación y puesta en funcionamiento de i .
$ia_i := ia(i)$	Saldo al inicio del período de planeamiento en i .
$tt_{fi} := tt(f, i)$	Costo de transporte por camión completo entre f e i .
$\pi_j := \pi(j)$	Precio de venta en el centro de consumo j .
$capcc_j := capcc(j)$	Capacidad de almacenaje en el centro de consumo j .
K	Cantidad de escenarios
$d_{jk}^n := d(j, k, n)$	Demanda en j para el período n en el escenario k
$p_k := p(k)$	Probabilidad de ocurrencia del escenario k
$t_{ij} := t(i, j)$	Costo unitario de transporte desde i hasta j
$r_j := r(j)$	Penalidad por cada unidad demandada e insatisfecha en j
$rd_i := rd(i)$	Penalidad por cada unidad redespachada desde i
$s_j := s(j)$	Penalidad por cada unidad en stock de un período al siguiente en j
$sf_f := sf(f)$	Penalidad por cada unidad en stock de un período al siguiente en f
$sd_i := sd(i)$	Penalidad por cada unidad en stock de un período al siguiente en i
Variables de decisión	
Símbolo	Descripción
x_{ij}^n	Unidades a enviar de i a j en el período n
y_{jk}^n	Unidades de demanda insatisfecha en j en el período n para el escenario k
w_{jk}^n	Unidades en stock en j al final del período n para el escenario k
zf_f^n	Cantidad de lotes de producción en f al final del período n
zs_f^n	Unidades en stock en f al final del período n
zt_i^n	Unidades en stock en i al final del período n
zc_{fi}^n	Cantidad de camiones completos enviados de f a i en el período n
zr_{iq}^n	Cantidad de unidades redespachadas desde i a q en el período n
zcd_i	Indica si se contrata (1) el centro de distribución i o no.

Apéndice B

Notación del modelo demanda en centros de distribución (Modelo CD)

En este anexo se presenta una tabla resumen de los parámetros y variables de decisión correspondientes al modelo con la demanda concentrada en los centros de distribución que se describe en el Capítulo [4](#).

CUADRO (B.1). Símbolos modelo CD.

Conjuntos	
Símbolo	Descripción
$P = \{1, \dots, N\}$	Períodos del horizonte de planeamiento
$CF = \{cf_f\}_{f=1}^F$	Centros de fabricación
$CD = \{cd_i\}_{i=1}^I$	Centros de distribución
Parámetros	
Símbolo	Descripción
$csf_f := csf(f)$	Costo de fabricación unitario en f .
$tl_f := tl(f)$	Tamaño del lote de fabricación en f .
$cp_f := cp(f)$	Capacidad máxima de producción en f .
$cpf_f := cpf(f)$	Capacidad de almacenaje en el centro de producción f .
$if_f := if(f)$	Saldo al inicio del período de planeamiento en f .
$cap_i := cap(i)$	Capacidad de almacenaje en el centro de distribución i .
$ia_i := ia(i)$	Saldo al inicio del período de planeamiento en i .
$tt_{fi} := tt(f, i)$	Costo de transporte por camión completo entre f e i .
$\pi_i := \pi(i)$	Precio de venta en el centro de distribución i .
K	Cantidad de escenarios
$d_{ik}^n := d(i, k, n)$	Demanda en i para el período n en el escenario k
$p_k := p(k)$	Probabilidad de ocurrencia del escenario k
$r_i := r(i)$	Penalidad por cada unidad demandada e insatisfecha en i
$rd_i := rd(i)$	Penalidad por cada unidad redespachada desde i
$sf_f := sf(f)$	Penalidad por cada unidad en stock de un período al siguiente en f
$sd_i := sd(i)$	Penalidad por cada unidad en stock de un período al siguiente en i
Variables de decisión	
Símbolo	Descripción
x_{fi}^n	Unidades a enviar de f a i en el período n
y_{ik}^n	Unidades de demanda insatisfecha en i en el período n para el escenario k
w_{ik}^n	Unidades en stock en i al final del período n para el escenario k
z_{ff}^n	Cantidad de lotes de producción en f al final del período n
zs_f^n	Unidades en stock en f al final del período n
zr_{iq}^n	Cantidad de unidades redespachadas desde i a q en el período n

Apéndice C

Modelo con la demanda en los centros de consumo

A continuación se incluye el código OPL correspondiente al modelo descrito en el Capítulo 3 Modelo CC.

```
int KN = ...; // Cantidad de Periodos.
range N = 1..KN;
range N2 = 2..KN;
int KF = ...; // Cantidad de Centros de Fabricacion.
range CF = 1..KF; // Enumeracion de los Centros de Fabricacion.
float CSF[CF] = ...; // Costos de Fabricacion en cada Centro.
int TL[CF] = ...; // Tamanios de los lotes de fabricacion.
int CProd[CF] = ...; // Capacidad de produccion.
int CPF[CF] = ...; // Capacidades de Almacenamiento en las fabricas.
int InFab[CF] = ...; // Saldos iniciales en los centros de fabricacion.
int KI = ...; // Cantidad de Centros de Distribucion Regionales.
range CD = 1..KI; // Enumeracion de los centros de distribucion.
int CAP[CD] = ...; // Capacidades de almacenamiento en CD.
float CFA[CD] = ...; // Costos Fijos de los CD.
int IA[CD] = ...; // Saldos iniciales en los CD.
float TT[CF][CD] = ...; // Costos de transporte las CF y los CD.
int ktt = ...; // Cantidad de Unidades en un camion completo.
int KC = ...; // Cantidad de Puntos de Venta.
range CC = 1..KC; // Enumeracion de los Centros de Consumo CC.
int CAPCC[CC] = ...; // Capacidad de Almacenamiento en los CC.
float Pi[CC] = ...; // Precio de Venta en cada punto de Venta.
int KK = ...; // Cantidad de escenarios a considerar.
range K = 1..KK;
```

```

int D[K][N][CC] = ...;           // Demandas.
float P[K] = ...;                // Probabilidades de Ocurrencia de cada escenario.
float T[CD][CC] = ...;          // Costo unitario de transporte para el reparto.
float R[CC] = ...;              // Penalidades x Demanda Insatisfecha.
float RD[CD] = ...;             // Penalidades x re-despacho entre CD.
float S[CC] = ...;              // Penalidades x Sobrante de Stock en CC.
float SD[CD] = ...;             // Penalidades x Sobrante de Stock en CD.
dvar float+ X[CD][CC][N];       // Cantidad a enviar.
dvar float+ Y[CC][N][K];        // Demanda insatisfecha.
dvar float+ W[CC][N][K];        // Sobrante de Stock en CC.
dvar int+ ZF[CF][N];            // Cantidad de lotes fabricados.
dvar float+ ZS[CF][N];          // Sobrante de Stock en los centros de fabricacion.
dvar float+ ZT[CD][N];          // Sobrante de Stock en los centros de distribucion.
dvar int+ ZC[CF][CD][N];        // Cantidad de camiones CF -> CD.
dvar float+ ZR[CD][CD][N];      // Cantidades que se resdespachan entre CD.
dvar boolean ZCD[CD];           // Contratar el CD.
dvar float Vtas;                // Monto Vendido.
dvar float VtasCant[CC][K];     // Ventas en unidades en CC para cada escenario.
dvar float Fab;                 // Costo de Fabricacion.
dvar float CT1;                 // Costo de Transporte CF -> CD.
dvar float CT2;                 // Costo de Transporte CD -> CC.
dvar float CCD1;                // Costo de puesta en marcha y funcionamiento CD.
dvar float CCD2;                // Costo de mantener el stock en CD.
dvar float CP1;                 // Penalidad por re-despachos.
dvar float CP2;                 // Penalidad esperada por demanda insatisfecha.
dvar float CP3;                 // Penalidad esperada por exceso de stocks en CC.
dvar float z;                   // Resultado esperado de la explotacion.

maximize

    z;

subject to

{
//

```

```

// Determina las unidades vendidas en cada centro de consumo y para cada escenario.
//
forall(j in CC, k in K)
  Ventas_Cantidades:
    VtasCant[j][k] == ( sum(n in N2)
      ( ( sum(i in CD)(X[i][j][n]) + W[j][n-1][k] - W[j][n][k] ) ) ) +
      ( ( sum(i in CD)(X[i][j][1]) ) - W[j][1][k] );
//
// A partir de las unidades vendidas en cada escenario determinar el monto de venta
// total esperado.
//
Ventas_Moneda:
Vtas == sum(j in CC,k in K)( VtasCant[j][k] * P[k] * Pi[j] );
//
// Determina los gastos de fabricación totales.
//
Fabricacion:
Fab == sum(f in CF, n in N)(CSF[f] * TL[f] * ZF[f][n]);
//
// Calcula el costo total del transporte entre los centros de
// fabricación y los de distribución.
//
Costo_Transporte_Fabricacion_Distribucion:
  CT1 == sum(f in CF, i in CD, n in N)(TT[f][i] * ZC[f][i][n]);
//
// Calcula el costo total de distribución desde los centros de
// distribución hacia los centros de consumo o puntos de venta.
//
Costo_Transporte_Distribucion_Consumo:
CT2 == sum(i in CD, j in CC, n in N)(T[i][j] * X[i][j][n]);
//
// Costo total de la contratación de los centros de distribución

```



```

// que se contratan.
//
Costo_Inicio_Centro_Distribucion:
  CCD1 == sum(i in CD)(CFA[i] * ZCD[i]);
//
// Costo total del stock en los centros de distribución.
//
Costo_Stock_Centro_Distribucion:
  CCD2 == sum(i in CD)( SD[i] * ( sum(n in N)(ZT[i][n]) ) );
//
// Penalidad total por redespachar unidades entre los centros
// de distribución.
//
Penalidad_re-despacho:
CP1 == sum(i in CD)( RD[i] * ( sum(q in CD: q!=i, n in N)(ZR[i][q][n]) ) );
//
// Penalidad esperada por demanda insatisfecha en los puntos de venta.
//
Penalidad_Demanda_Insatisfecha:
  CP2 == sum(j in CC, k in K, n in N)(R[j]* Y[j][n][k] * P[k]);
//
// Penalidad esperada por sobrante de stock en los puntos de venta.
//
Penalidad_Sobre_Stock:
  CP3 == sum(j in CC, k in K, n in N)(S[j] * W[j][n][k] * P[k]);
//
// Cálculo del resultado de toda la campaña.
// Este cálculo es el que se busca maximizar.
//
Resultado_Explotacion:
  z == Vtas - Fab - CT1 - CT2 - CCD1 - CCD2 - CP1 - CP2 - CP3;
//

```

```

// Determinación del stock en los centros de fabricación.
//
forall(n in N2, f in CF)
Stock_Centro_Fabricacion_2:
ZS[f][n] == ZS[f][n-1] + TL[f] * ZF[f][n] - ktt * ( sum(i in CD)(ZC[f][i][n]) );
forall(f in CF)
Stock_Centro_Fabricacion:
ZS[f][1] == InFab[f] + TL[f] * ZF[f][1] - ktt * ( sum(i in CD)(ZC[f][i][1]) );
//
// Al final del día el stock en los centros de fabricación no deben
// superar su capacidad.
//
forall(f in CF, n in N)
    Capacidad_Almacenaje_Fabrica:
ZS[f][n] <= CPF[f];
//
// La cantidad de lotes de producción que se culminan en un período no
// debe superar la capacidad de producción del centro de fabricación.
//
forall(f in CF, n in N)
Capacidad_Produccion_Fabrica:
ZF[f][n] <= CProd[f];
//
// Envios desde los centros de fabricación a los centros de distribución
// no deben superar el stock del centro de distribución.
//
forall(f in CF, n in N2)
Envios_Fabricas_Centros_Distribucion_2:
ktt * ( sum(j in CD)(ZC[f][j][n]) ) <= ZS[f][n];
forall(f in CF)
Envios_Fabricas_Centros_Distribucion:
ktt * ( sum(j in CD)(ZC[f][j][1]) ) <= InFab[f];

```

```

//
// Stocks existentes en los centros de distribución.
//
forall(i in CD, n in N2)
Stocks_Centros_Distribucion_2:
ZT[i][n] == ZT[i][n-1] +
            ktt * ( sum(j in CF)(ZC[j][i][n]) ) +
( sum(q in CD : q != i)(ZR[q][i][n]) ) -
( sum(j in CC)(X[i][j][n]) ) -
( sum(q in CD : q!=i)(ZR[i][q][n]) );
forall(i in CD)
Stocks_Centros_Distribucion:
ZT[i][1] == IA[i] +
            ktt * ( sum(j in CF)(ZC[j][i][1]) ) +
( sum(q in CD : q != i)(ZR[q][i][1]) ) -
( sum(j in CC)(X[i][j][1]) ) -
( sum(q in CD : q!=i)(ZR[i][q][1]) );
//
// El stock existente en el centros de distribución no debe
// superar su capacidad de almacenamiento.
//
forall(i in CD, n in N2)
Capacidad_Centro_Distribucion_2:
ZT[i][n-1] +
ktt * ( sum(j in CF)(ZC[j][i][n]) ) +
( sum(q in CD : q != i)(ZR[q][i][n]) ) <= CAP[i] * ZCD[i];
forall(i in CD)
Capacidad_Centro_Distribucion_1:
IA[i] +
ktt * ( sum(j in CF)(ZC[j][i][1]) ) +
( sum(q in CD : q != i)(ZR[q][i][1]) ) <= CAP[i] * ZCD[i];
//

```

```

// Cobertura de la cantidad demandada en cada escenario con los
// envíos realizados desde los centros de distribución ajustada
// por el sobrante de stock y la demanda insatisfecha.
//
forall(j in CC, n in N2, k in K)
    Satisfaccion_Demanda_21:
W[j] [n-1] [k] -
W[j] [n] [k] +
Y[j] [n] [k] +
sum(i in CD)(X[i] [j] [n]) <= D[k] [n] [j];
forall(j in CC, n in N2, k in K)
    Satisfaccion_Demanda_22:
W[j] [n-1] [k] -
W[j] [n] [k] +
Y[j] [n] [k] +
sum(i in CD)(X[i] [j] [n]) >= D[k] [n] [j];
forall(j in CC, k in K)
    Satisfaccion_Demanda_11:
Y[j] [1] [k] -
W[j] [1] [k] +
sum(i in CD)(X[i] [j] [1]) <= D[k] [1] [j];
forall(j in CC, k in K)
    Satisfaccion_Demanda_12:
Y[j] [1] [k] -
W[j] [1] [k] +
sum(i in CD)(X[i] [j] [1]) >= D[k] [1] [j];
//
// El sobrante de stock no debe superar la capacidad de
// almacenamiento de los centros de consumo.
//
forall(j in CC, n in N, k in K)
    Sobrante_Stock_Consumo:

```

```
W[j] [n] [k] <= CAPCC[j];  
}
```

Apéndice D

Log parcial modelo CC con un escenario

A continuación se muestra la hoja inicial y una hoja intermedia del log generado al ejecutar la optimización del modelo CC con variables enteras y únicamente un escenario.

Durante el inicio de la optimización se observa la magnitud del gap producido manteniéndose durante varias iteraciones hasta que se disminuye considerablemente y a partir de ahí le resulta difícil a CPLEX continuar reduciendo el gap e incluso se observan reinicios de la optimización.

```
<<< setup
```

```
<<< generate
```

```
Version identifier: 12.10.0.0 | 2019-11-26 | 843d4de2ae
```

```
Tried aggregator 2 times.
```

```
MIP Presolve eliminated 25909 rows and 12749 columns.
```

```
Aggregator did 12207 substitutions.
```

```
Reduced MIP has 1424 rows, 106560 columns, and 216725 nonzeros.
```

```
Reduced MIP has 8 binaries, 423 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
```

```
Presolve time = 0,34 sec. (303,93 ticks)
```

```
Found incumbent of value -1811437,250000 after 0,48 sec. (407,74 ticks)
```

```
Tried aggregator 1 time.
```

```
Detecting symmetries...
```

```
Reduced MIP has 1424 rows, 106560 columns, and 216725 nonzeros.
```

```
Reduced MIP has 8 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
```

```
Presolve time = 0,11 sec. (84,34 ticks)
```

```
Probing time = 0,09 sec. (5,89 ticks)
```

MIP emphasis: balance optimality and feasibility.

MIP search method: dynamic search.

Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.

Root relaxation solution time = 0,45 sec. (420,98 ticks)

Nodes			Cuts/				
Node	Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap
*	0+	0		-1811437,2500	7,39041e+09		---
*	0+	0		-1285399,7500	7,39041e+09		---
	0	0	2,13143e+08	297 -1285399,7500	2,13143e+08	2859	---
	0	0	2,12494e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 456	3340	---
	0	0	2,11855e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 456	3693	---
	0	0	2,11769e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 456	3942	---
	0	0	2,11702e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 456	4199	---
	0	0	2,11684e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 456	4404	---
Detecting symmetries...							
	0	0	2,11679e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 456	4602	---
	0	0	2,11676e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 248	4724	---
	0	0	2,11675e+08	297 -1285399,7500	Cuts: 110	4793	---
Detecting symmetries...							
	0	2	2,11675e+08	266 -1285399,7500	2,11675e+08	4793	---
Elapsed time = 7,94 sec. (6413,12 ticks, tree = 0,02 MB, solutions = 2)							
	44	39	2,11675e+08	274 -1285399,7500	2,11675e+08	4952	---
	61	53	2,11675e+08	275 -1285399,7500	2,11675e+08	5026	---
	106	87	2,11675e+08	277 -1285399,7500	2,11675e+08	5339	---
	182	152	2,11671e+08	255 -1285399,7500	2,11675e+08	5621	---
	310	229	2,11670e+08	245 -1285399,7500	2,11675e+08	6067	---
	405	391	2,11670e+08	243 -1285399,7500	2,11675e+08	6885	---
	445	408	2,11666e+08	243 -1285399,7500	2,11675e+08	7322	---

...

65785	57924	2,11588e+08	139	2,11367e+08	2,11651e+08	409735	0,13%
66867	58867	2,11582e+08	200	2,11367e+08	2,11651e+08	415068	0,13%
67710	59891	2,11604e+08	212	2,11367e+08	2,11651e+08	420905	0,13%
68642	61102	2,11598e+08	244	2,11367e+08	2,11651e+08	428128	0,13%
69682	61981	2,11603e+08	241	2,11367e+08	2,11651e+08	432921	0,13%
*	69796+31070			2,11367e+08	2,11651e+08		0,13%
70900	63309	2,11604e+08	254	2,11367e+08	2,11651e+08	439274	0,13%
*	71569+31156			2,11383e+08	2,11651e+08		0,13%
71950	64130	2,11545e+08	200	2,11383e+08	2,11651e+08	443752	0,13%
72732	64166	2,11588e+08	184	2,11383e+08	2,11651e+08	449946	0,13%

Elapsed time = 924,05 sec. (340516,13 ticks, tree = 2984,87 MB, solutions = 45)

Nodefile size = 933,85 MB (365,82 MB after compression)

Performing restart 2

Repeating presolve.

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 1423 rows, 106558 columns, and 216437 nonzeros.

Reduced MIP has 9 binaries, 467 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,11 sec. (62,87 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 1423 rows, 106558 columns, and 216437 nonzeros.

Reduced MIP has 9 binaries, 467 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,11 sec. (91,87 ticks)

Represolve time = 10,19 sec. (628,97 ticks)

73088	0	2,11661e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 121	458858	0,12%
73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 127	458904	0,12%
73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 75	458932	0,12%
73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 31	458970	0,12%
73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 65	458989	0,12%
73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	MIRcuts: 21	459006	0,12%

73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 53	459045	0,12%
73088	0	2,11660e+08	277	2,11383e+08	Cuts: 26	459062	0,12%
73088	2	2,11660e+08	273	2,11383e+08	2,11643e+08	459062	0,12%
73192	93	2,11628e+08	258	2,11383e+08	2,11643e+08	459771	0,12%
73501	318	2,11625e+08	226	2,11383e+08	2,11643e+08	461740	0,12%
74397	1114	2,11593e+08	201	2,11383e+08	2,11643e+08	466439	0,12%

...

2960844	2790411	2,11606e+08	223	2,11466e+08	2,11635e+08	16114701	0,08%
2966081	2797189	2,11613e+08	233	2,11466e+08	2,11635e+08	16156290	0,08%
2971445	2798651	2,11573e+08	138	2,11466e+08	2,11635e+08	16164704	0,08%
2976762	2804008	2,11582e+08	229	2,11466e+08	2,11635e+08	16198161	0,08%
2982345	2811041	2,11561e+08	177	2,11466e+08	2,11635e+08	16241722	0,08%

Elapsed time = 27235,75 sec. (8353272,32 ticks, tree = 114880,59 MB, solutions = 72)

Nodefile size = 112781,43 MB (37051,77 MB after compression)

2987971	2816399	2,11575e+08	202	2,11466e+08	2,11635e+08	16275040	0,08%
2993355	2822892	2,11566e+08	148	2,11466e+08	2,11635e+08	16316006	0,08%
2998804	2824829	2,11559e+08	120	2,11466e+08	2,11635e+08	16327949	0,08%
3004352	2830271	2,11581e+08	222	2,11466e+08	2,11635e+08	16361569	0,08%
3009747	2837663	2,11547e+08	169	2,11466e+08	2,11635e+08	16408436	0,08%
3015201	2844392	2,11632e+08	246	2,11466e+08	2,11635e+08	16449609	0,08%
3020604	2848838	2,11603e+08	226	2,11466e+08	2,11635e+08	16477309	0,08%
3025990	2855196	2,11582e+08	150	2,11466e+08	2,11635e+08	16517291	0,08%
3031287	2861578	2,11567e+08	123	2,11466e+08	2,11635e+08	16556212	0,08%
3036857	2863339	2,11580e+08	180	2,11466e+08	2,11635e+08	16567105	0,08%

Elapsed time = 27824,63 sec. (8505878,40 ticks, tree = 117037,06 MB, solutions = 72)

Nodefile size = 114935,48 MB (37779,92 MB after compression)

3042553	2868810	2,11574e+08	88	2,11466e+08	2,11635e+08	16601093	0,08%
3047938	2876778	2,11613e+08	218	2,11466e+08	2,11635e+08	16652524	0,08%
3053216	2882738	2,11467e+08	121	2,11466e+08	2,11635e+08	16689109	0,08%
3058661	2883737	2,11563e+08	171	2,11466e+08	2,11635e+08	16695440	0,08%

3064146	2892692	2,11561e+08	134	2,11466e+08	2,11635e+08	16750610	0,08%
3069677	2900382	2,11514e+08	92	2,11466e+08	2,11635e+08	16797083	0,08%
3074939	2903329	2,11549e+08	131	2,11466e+08	2,11635e+08	16814509	0,08%
3080312	2908191	2,11577e+08	198	2,11466e+08	2,11635e+08	16845806	0,08%
3085893	2914804	2,11495e+08	133	2,11466e+08	2,11635e+08	16886529	0,08%
3091517	2920006	2,11603e+08	213	2,11466e+08	2,11635e+08	16920010	0,08%

Elapsed time = 28409,05 sec. (8658487,53 ticks, tree = 119373,62 MB, solutions = 72)

Nodefile size = 117281,81 MB (38575,29 MB after compression)

...

Post-procesamiento optimización CPLEX modelo CC

A continuación se incluye el código OPL correspondiente al procesamiento que se realiza luego de la ejecución de CPLEX para transferir los valores de las variables a la base de datos PostgreSQL en el modelo con la demanda en los puntos de venta (modelo CC).

Esta impresiones en el log son interpretadas por el módulo que solicita la ejecución de CPLEX.

La finalidad de este código es agregar información de los resultados de la optimización en el log generado por CPLEX.

Las líneas agregadas al log mantienen una estructura que le entrega información al módulo de Resultados (Sección [1](#) del Capítulo para por un lado, enviar los resultados a la base de datos y también realizar evaluaciones sobre los resultados de la optimización.

La estructura tiene los siguientes elementos

- nombre de la variable cuyo valor se indica,
- indicador del centro de fabricación,
- indicador del centro de distribución,
- indicador del centro de consumo,
- número de período,
- número de escenario,
- valor de la variable.

```
execute DISPLAY {
```

```
var j;
var i;
var n;
var k;
var f;
writeln("Cantidades a Enviar");
for(n in N){
    for(i in CD){
        for(j in CC){
            if(X[i][j][n]>0){
                writeln("R:{X,0,"i","j","n",0," X[i][j][n]"}");
            }
        }
    }
}
writeln("Cantidad de Lotes Fabricados");
for(n in N){
    for(f in CF){
        if(ZF[f][n]>0){
            writeln("R:{ZF,"f",0,0,"n",0," ZF[f][n]"}");
        }
    }
}
writeln("Cantidad de Camiones CF a CD");
for(n in N){
    for(f in CF){
        for(i in CD){
            if(ZC[f][i][n]>0){
                writeln("R:{ZC,"f","i",0,"n",0," ZC[f][i][n]"}");
            }
        }
    }
}
```

```
}
writeln("Cantidad de unidades que se redespachan entre CD");
for(n in N){
    for(i1 in CD){
for(i2 in CD){
if(ZR[i1][i2][n]>0){
writeln("R:{ZR,\"i1\",\",i2\",0,\"n\",0,\" ZR[i1][i2][n],\"};");
}
}
    }
}
writeln("Cantidad de unidades Vendidas en cada localidad y escenario");
for(j in CC){
    for(k in K){
writeln("R:{CV,0,0,\"j\",0,\"k\",\", VtasCant[j][k],\"};");
    }
}
writeln("Contrata el Centro de Distribucion");
for(i in CD){
if(ZCD[i]>0){
writeln("R:{ZCD,0,\"i\",0,0,0,\" ZCD[i],\"};");
}
}
writeln("R:{Vtas,0,0,0,0,0,\" Vtas,\"};");
writeln("R:{Fab,0,0,0,0,0,\" Fab,\"};");
writeln("R:{CT1,0,0,0,0,0,\" CT1,\"};");
writeln("R:{CT2,0,0,0,0,0,\" CT2,\"};");
writeln("R:{CCD1,0,0,0,0,0,\" CCD1,\"};");
writeln("R:{CCD2,0,0,0,0,0,\" CCD2,\"};");
writeln("R:{CP1,0,0,0,0,0,\" CP1,\"};");
writeln("R:{CP2,0,0,0,0,0,\" CP2,\"};");
writeln("R:{CP3,0,0,0,0,0,\" CP3,\"};");
```

```
writeln("R:{Resultado,0,0,0,0,0,", z,"}");  
}
```

Función objetivo del ejemplo numérico del modelo CC

En el Cuadro **F.1** se muestran los valores que impactan en la función objetivo del modelo con la demanda en los centros de consumo o puntos de venta (ModeloCC). Se ven los distintos rubros que la componen: ventas, costos de fabricación, costos de transporte de los centros de fabricación a los centros de distribución y de los centros de distribución a los centros de consumo, costos de funcionamiento del centro de distribución fijos y variables, resultado de la explotación previo a la afectación por las penalidades, penalidades por re-despacho, demanda insatisfecha y exceso de stock al final del período, y por último el valor de la función objetivo que descuenta del resultado de la explotación las penalidades.

Se ve que el impacto de las penalidades crece a medida que se incrementa la cantidad de escenarios creciendo la que corresponde a demanda insatisfecha y disminuyendo, en menor medida, la que corresponde al exceso de stock.

CUADRO (F.1). Valores de la función objetivo del ejemplo numérico del modelo CC

Escen.	Ventas	Fabricación	Costos			C. Distrib	Resultados antes de Penalidades	Penalizaciones			Resultado Función Objetivo
			a C. Dist.	Transporte a P. Vta.	Fijos			Redesp.	Demanda Insat.	Exceso Stock	
10	63300945	10127961	815041	4130838	1080000	30482	47116623	144705	853734	88049	46030135
20	50206780	8107778	760826	3407215	900000	25599	37005362	0	925959	78876	36000527
30	45827120	7430849	684219	3153594	900000	24099	33634359	0	951250	71791	32611318
40	42802131	6941607	636383	2951199	900000	22637	31350305	0	957405	65711	30327189
50	41492754	6731064	617502	2846274	900000	22456	30375458	0	973736	62620	29339102
60	39589568	6417665	588819	2679106	900000	21791	28982187	0	975754	59909	27946525
70	37867796	6148435	557040	2494926	900000	21153	27746242	0	988957	57024	26700260
80	36045541	5846915	533519	2395023	900000	20191	26349893	0	998056	54028	25297809
90	34409255	5586222	507332	2259617	900000	19397	25136687	0	1009366	52209	24075111
100	33406069	5428443	483535	2189472	900000	18570	24386049	0	1024014	50615	23311420
110	33053448	5373777	479412	2160089	900000	18307	24121863	0	1023141	49777	23048945
120	32759483	5326044	474283	2132609	900000	18173	23908374	0	1025808	48394	22834172
130	30392225	4961259	437194	2143470	720000	16727	22113575	0	1037018	45535	21031023
140	29876004	4869719	424968	2097146	720000	16451	21747720	0	1041423	44058	20662238
150	29525358	4811844	420367	2073684	720000	16312	21483151	0	1042269	42677	20398205
160	28403413	4626906	404467	1995467	720000	15519	20641054	0	1052386	40491	19548178
170	28249469	4600713	402745	1982162	720000	15334	20528515	0	1054232	40005	19434278
180	28015540	4561830	399697	1973369	720000	15323	20345321	0	1059848	39894	19245578
190	27268617	4441135	388720	1933344	720000	14751	19770667	0	1062978	38400	18669290
200	26678894	4352140	381387	1913055	720000	14539	19297773	0	1066163	37811	18193801
210	26652665	4347097	380734	1909997	720000	14602	19280235	0	1066818	37562	18175855
220	25928291	4226631	364738	1863593	720000	13892	18739437	0	1071782	37052	17630604
230	25377564	4140194	358610	1825455	720000	13473	18319832	0	1077458	36405	17205968
240	24938382	4075226	353637	1801364	720000	13243	17974912	0	1080640	36058	16858213
250	24502860	4005154	345938	1773596	720000	13020	17645152	0	1084520	35070	16525562
260	24290208	3967790	342982	1772960	720000	12727	17473749	0	1087671	34612	16351465
270	23612131	3856199	334436	1740398	720000	12104	16948994	0	1092321	33326	15823347
280	23313567	3813231	331189	1727506	720000	11927	16709714	0	1093767	33293	15582652
290	22891677	3747691	321799	1690738	720000	11531	16399918	0	1097993	32591	15269336

CUADRO (F.2). Valores de la función objetivo del ejemplo numérico del modelo CC

Escen.	Ventas	Costos						Resultado antes de Penalidades	Penalizaciones			Resultado Función Objetivo
		Fabricación	Transporte		C. Distrib		Redesp.		Demanda Insat.	Exceso Stock		
			a C. Dist.	a P. Vta.	Fijos	VARIABLES						
300	22897215	3748780	321883	1691228	720000	11539	16403785	0	1098805	32635	15272345	
310	22420962	3672500	330302	1653308	720000	11133	16033719	0	1097644	31982	14904095	
320	22066249	3611391	325382	1623250	720000	10944	15775282	0	1100033	31291	14643956	
330	21632385	3538587	316066	1591110	720000	10577	15456045	0	1101392	31043	14323608	
340	21625459	3538683	316043	1591415	720000	10577	15448741	0	1098363	31266	14319112	
350	21404747	3500560	313048	1576569	720000	10376	15284194	0	1101029	30581	14152585	
360	21318478	3487663	312137	1574895	720000	10392	15213391	0	1102217	30483	14080692	
370	20430496	3339772	300214	1491624	720000	9512	14569374	0	1106291	29323	13433760	
380	20383150	3331996	299495	1489222	720000	9396	14533041	0	1106413	29278	13397350	
390	20012255	3275831	295246	1452892	720000	9081	14259205	0	1107460	28798	13122945	
400	20013431	3275831	295238	1452852	720000	9126	14260384	0	1107505	28717	13124161	

Modelo con la demanda en los centros de distribución

A continuación se incluye el código OPL correspondiente al modelo descrito en el Capítulo 4.

```

int KN = ...; // Cantidad de Periodos
range N = 1..KN;
range N2 = 2..KN;
int KF = ...; // Cantidad de Centros de Fabricacion
range CF = 1..KF; // Enumeracion de los Centros de Fabricacion
float CSF[CF] = ...; // Costos de Fabricacion en cada Centros de
// Fabricacion
int TL[CF] = ...; // Tamanios de los lotes de fabricacion
int CProd[CF] = ...; // Capacidad de produccion
int CPF[CF] = ...; // Capacidades de Almacenamiento en los centros de
// Fabricacion
int InFab[CF] = ...; // Saldos iniciales en los centros de fabricacion
int KI = ...; // Cantidad de Centros de Distribucion
range CD = 1..KI; // Enumeracion de los Centros de Distribucion
int CAP[CD] = ...; // Capacidades de almacenamiento en los centros
// de distribucion
int IA[CD] = ...; // Saldos iniciales al procesos en los centros de
// distribucion
float TT[CF][CD] = ...; // Costos de transporte del camion completo entre
// las fabricas y los centros de distribucion.
int ktt = ...; // Cantidad de Unidades en un camion completo.

```

```

float Pi[CD] = ...;           // Precio de Venta en cada centro de distribucion
int KK = ...;                // Cantidad de escenarios a considerar.
range K = 1..KK;
int D[K][N][CD] = ...;      // Demandas
float P[K] = ...;           // Probabilidades de Ocurrencia de cada escenario
float R[CD] = ...;          // Penalidades x Demanda Insatisfecha.
float RD[CD] = ...;         // Penalidades x re-despacho
float SF[CF] = ...;         // Penalidades x Sobrante de Stock en el Centro de
// Fabricacion.
float SD[CD] = ...;         // Penalidades x Sobrante de Stock en un centro de
// Distribucion.
dvar float+ X[CF][CD][N];   // Cantidad de camiones a enviar desde los centros
// de fabricacion a los centros de distribucion
dvar float+ Y[CD][N][K];    // Demanda insatisfecha
dvar float+ W[CD][N][K];    // Sobrante de Stock en los centros de distribucion
dvar float+ ZF[CF][N];      // Cantidad de lotes fabricados
dvar float+ ZS[CF][N];      // Sobrante de Stock en los centros de fabricacion
dvar float+ ZR[CD][CD][N];  // Cantidades que se resdespachan entre centros de
// distribucion
dvar float Vtas;            // Monto Vendido
dvar float VtasCant[CD][K]; // Ventas en unidades en el centro de distribucion
// i para el escenario k
dvar float Fab;            // Costo de Fabricacion
dvar float CT;             // Costo de Transporte desde los centros de fabrica-
// cion a los centros de distribucion
dvar float CP1;            // Penalidad por re-despachos en los centros de distri-
// bucion
dvar float CP2;            // Penalidad esperada por demanda insatisfecha
dvar float CP3;            // Penalidad esperada por exceso de stocks
dvar float z;              // Resultado esperado de la explotacion
maximize
    z;

```

```

subject to
{
//
// Determina las unidades vendidas desde cada centro de distribución y para
// cada escenario.
//
forall(i in CD, k in K)
    Ventas_Cantidades:
        VtasCant[i][k] == ( sum(n in N2)( ( sum(f in CF)
            (ktt * X[f][i][n]) + W[i][n-1][k] - W[i][n][k] ) ) ) +
            ( ( sum(f in CF)(ktt * X[f][i][1]) ) - W[i][1][k] );
//
// A partir de las unidades vendidas calcula el monto esperada de la venta.
//
    Ventas_Moneda:
        Vtas == sum(i in CD,k in K)( VtasCant[i][k] * P[k] * Pi[i] );
//
// Calcula los gastos de fabricación totales
//
    Fabricacion:
        Fab == sum(f in CF, n in N)(CSF[f] * TL[f] * ZF[f][n]);
//
// Determinación de los costos totales de transporte desde los centros de
// fabricación a los centros de distribución
//
    Costo_Transporte_Fabricacion_Distribucion:
        CT == sum(f in CF, i in CD, n in N)(TT[f][i] * X[f][i][n]);
//
// Penalidad total por la redistribución de las unidades entre los centros
// de distribución
//
    Penalidad_re-despacho:

```

```

CP1 == sum(i in CD)( RD[i] * ( sum(q in CD: q!=i, n in N)(ZR[i][q][n]) ) );
//
// Cálculo de la penalidad esperada por demanda insatisfecha.
//
Penalidad_Demanda_Insatisfecha:
CP2 == sum(i in CD, k in K, n in N)(R[i] * Y[i][n][k] * P[k]);
//
// Determinación de la penalidad esperada por exceso de stock.
//
Penalidad_Sobre_Stock:
CP3 == sum(i in CD, k in K, n in N)(SD[i] * W[i][n][k] * P[k]);
//
// Cálculo del resultado económico esperado de la campaña
// Valor a optimizar.
//
Resultado_Explotacion:
z == Vtas - Fab - CT - CP1 - CP2 - CP3;
//
// Determinación del stock en los centros de fabricación
//
forall(n in N2, f in CF)
Stock_Centro_Fabricacion_2:
ZS[f][n] == ZS[f][n-1] + TL[f] * ZF[f][n] - ktt * ( sum(i in CD)(X[f][i][n]) );
forall(f in CF)
Stock_Centro_Fabricacion:
ZS[f][1] == InFab[f] + TL[f] * ZF[f][1] - ktt * ( sum(i in CD)(X[f][i][1]) );
//
// Al final del día el stock en el centro de fabricación no debe superar su
// capacidad de almacenamiento.
forall(f in CF, n in N)
Capacidad_Almacenaje_Fabrica:
ZS[f][n] <= CPF[f];

```

```

forall(f in CF, n in N)
Capacidad_Produccion_Fabrica:
ZF[f][n] <= CProd[f];
//
// Los envíos desde los centros de fabricación no deben superar
// el stock existente en el mismo.
//
forall(f in CF, n in N2)
Envios_Fabricas_Centros_Distribucion_2:
ktt * ( sum(i in CD)(X[f][i][n]) ) <= ZS[f][n];
forall(f in CF)
Envios_Fabricas_Centros_Distribucion:
ktt * ( sum(i in CD)(X[f][i][1]) ) <= InFab[f];
//
// El stock en el centro de distribución no debe superar su
// capacidad de almacenamiento
//
forall(i in CD, n in N, k in K)
    Sobrante_Stock_Distribucion:
W[i][n][k] <= CAP[i];
//
// La cantidad demandada en cada centro de distribución en cada
// escenario debe ser cubierta con las recepciones desde los
// centros de fabricación y el sobrante de stock.
// Ajustado por la demanda instisfecha.
//
forall(i in CD, n in N2, k in K)
    Satisfaccion_Demamda_21:
W[i][n-1][k] - W[i][n][k] + Y[i][n][k] + ktt * sum(f in CF)(X[f][i][n]) <= D[k][n][i];
forall(i in CD, n in N2, k in K)
    Satisfaccion_Demamda_22:
W[i][n-1][k] - W[i][n][k] + Y[i][n][k] + ktt * sum(f in CF)(X[f][i][n]) >= D[k][n][i];

```



```
forall(i in CD, k in K)
  Satisfaccion_Demanda_11:
  Y[i][1][k] - W[i][1][k] + ktt * sum(f in CF)(X[f][i][1]) <= D[k][1][i];
forall(i in CD, k in K)
  Satisfaccion_Demanda_12:
  Y[i][1][k] - W[i][1][k] + ktt * sum(f in CF)(X[f][i][1]) >= D[k][1][i];
}
```

Post-procesamiento optimización CPLEX modelo CD

A continuación se incluye el código OPL correspondiente al procesamiento que se realiza luego de la ejecución de CPLEX para transferir los valores de las variables a la base de datos PostgreSQL.

Esta impresiones en el log son interpretadas por el módulo “Resultado” descrito en el Capítulo [E](#) Sección [1](#)

La estructura generada con los resultados de la optimización quedan registrados mediante una estructura similar a la descrita en el Anexo [E](#)

```
execute DISPLAY {
  var j;
  var i;
  var i2;
  var n;
  var k;
  var f;
  writeln("Cantidades a Enviar");
  for(n in N){
    for(f in CF){
      for(i in CD){
        if(X[f][i][n]>0){
          writeln("R:{X,"f","i","0","n","0"," X[f][i][n] ,"}");
        }
      }
    }
  }
}
```

```
}
writeln("Cantidad de Lotes Fabricados");
for(n in N){
  for(f in CF){
    if(ZF[f][n]>0){
writeln("R:{ZF,"f","0,0","n","0"," ZF[f][n],"}");
}
  }
}
writeln("Cantidad de re-despachos");
for(n in N){
  for(i in CD){
    for(i2 in CD){
if(ZR[i][i2][n]>0){
  writeln("R:{ZR,0","i,i2,n","0"," ZR[i][i2][n],"}");
}
  }
}
}
writeln("R:{Vtas,0,0,0,0,0," Vtas,"}");
writeln("R:{Fab,0,0,0,0,0," Fab,"}");
writeln("R:{CT,0,0,0,0,0," CT,"}");
writeln("R:{CP1,0,0,0,0,0," CP1,"}");
writeln("R:{CP2,0,0,0,0,0," CP2,"}");
writeln("R:{CP3,0,0,0,0,0," CP3,"}");
writeln("R:{Resultado,0,0,0,0,0," z,"}");
}
```

Apéndice I

Logs CPLEX del modelo con la demanda en los C.

D.

En esta sección se pueden extracto de los registros producidos por la ejecuciones de CPLEX para resolver en modelo con la demanda centrada en los centros de distribución descrito en el Capítulo [4](#)

Para 10 escenarios:

```
Version identifier: 12.10.0.0 | 2019-11-26 | 843d4de2ae
CPXPARAM_TimeLimit                1200
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 7944 rows and 3736 columns.
Aggregator did 793 substitutions.
Reduced MIP has 3062 rows, 6406 columns, and 13523 nonzeros.
Reduced MIP has 0 binaries, 423 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0,03 sec. (20,39 ticks)
Found incumbent of value -5,6843035e+08 after 0,03 sec. (28,26 ticks)
Tried aggregator 1 time.
Detecting symmetries...
Reduced MIP has 3062 rows, 6406 columns, and 13523 nonzeros.
Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0,02 sec. (7,24 ticks)
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0,13 sec. (107,89 ticks)
```

Nodes		Cuts/						
Node	Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap	
*	0+	0		-5,68430e+08	1,89944e+10		---	
*	0+	0		-1,14504e+07	1,89944e+10		---	
	0	0	1,73522e+08	323	-1,14504e+07	1,73522e+08	4202	---
	0	0	1,73474e+08	323	-1,14504e+07	Cuts: 865	4577	---
	0	0	1,73450e+08	323	-1,14504e+07	Cuts: 865	5030	---
	0	0	1,73438e+08	323	-1,14504e+07	Cuts: 362	5215	---
	0	0	1,73437e+08	323	-1,14504e+07	Cuts: 152	5314	---
	0	0	1,73436e+08	323	-1,14504e+07	Cuts: 93	5370	---

Detecting symmetries...

Detecting symmetries...

	0	2	1,73436e+08	293	-1,14504e+07	1,73436e+08	5370	---
Elapsed time = 0,84 sec. (577,49 ticks, tree = 0,02 MB, solutions = 2)								
	763	697	1,73425e+08	251	-1,14504e+07	1,73436e+08	8443	---
	1699	1516	1,73333e+08	181	-1,14504e+07	1,73436e+08	11131	---
	2132	2035	1,73336e+08	145	-1,14504e+07	1,73436e+08	13720	---
	2611	2575	1,73295e+08	110	-1,14504e+07	1,73436e+08	18877	---
	3174	3067	1,72652e+08	65	-1,14504e+07	1,73436e+08	22851	---
	3873	3783	1,72753e+08	27	-1,14504e+07	1,73436e+08	27177	---
*	4334	4163	integral	0	1,71065e+08	1,73436e+08	29719	1,39%
*	4336	4096	integral	0	1,71159e+08	1,73436e+08	29418	1,33%
*	4494	4163	integral	0	1,71895e+08	1,73436e+08	30208	0,90%
	5166	4354	1,73424e+08	221	1,71895e+08	1,73436e+08	31944	0,90%

Elapsed time = 4,39 sec. (3703,73 ticks, tree = 11,47 MB, solutions = 6)

Performing restart 1

Repeating presolve.

Tried aggregator 1 time.

MIP Presolve modified 1342 coefficients.

Reduced MIP has 3062 rows, 6406 columns, and 12603 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,02 sec. (6,28 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 3062 rows, 6406 columns, and 12603 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,02 sec. (7,57 ticks)

Represolve time = 0,05 sec. (25,30 ticks)

5167	0	1,73431e+08	298	1,71895e+08	Cuts: 184	38499	0,89%
5167	0	1,73428e+08	298	1,71895e+08	Cuts: 218	38591	0,89%
5167	0	1,73426e+08	298	1,71895e+08	Cuts: 169	38664	0,89%
5167	0	1,73426e+08	298	1,71895e+08	Cuts: 112	38728	0,89%
5167	0	1,73425e+08	298	1,71895e+08	Cuts: 160	38787	0,89%
5167	0	1,73425e+08	298	1,71895e+08	Cuts: 107	38839	0,89%

...

71462	61696	1,73267e+08	209	1,72406e+08	1,73415e+08	319524	0,58%
-------	-------	-------------	-----	-------------	-------------	--------	-------

Performing restart 2

Repeating presolve.

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 3062 rows, 6406 columns, and 12603 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,00 sec. (5,06 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 3062 rows, 6406 columns, and 12603 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,00 sec. (7,53 ticks)

Represolve time = 0,08 sec. (37,19 ticks)

73811	0	1,73412e+08	269	1,72406e+08	Cuts: 180	340668	0,58%
73811	0	1,73411e+08	269	1,72406e+08	Cuts: 266	340748	0,58%
73811	0	1,73411e+08	269	1,72406e+08	Cuts: 194	340803	0,58%
73811	0	1,73399e+08	269	1,72406e+08	Cuts: 91	340872	0,58%

...

2042019 1960061 1,73268e+08 184 1,72708e+08 1,73377e+08 10827737 0,39%

Elapsed time = 1199,91 sec. (487315,26 ticks, tree = 5141,96 MB, solutions = 468)

Nodefile size = 3092,63 MB (498,19 MB after compression)

Mixed integer rounding cuts applied: 492

Lift and project cuts applied: 5

Gomory fractional cuts applied: 71

Root node processing (before b&c):

Real time = 0,94 sec. (609,74 ticks)

Parallel b&c, 8 threads:

Real time = 1203,44 sec. (500298,39 ticks)

Sync time (average) = 152,53 sec.

Wait time (average) = 0,03 sec.

Total (root+branch&cut) = 1204,38 sec. (500908,13 ticks)

Para 210 escenarios:

Version identifier: 12.10.0.0 | 2019-11-26 | 843d4de2ae

CPXPARAM_TimeLimit 1200

Tried aggregator 2 times.

MIP Presolve eliminated 164744 rows and 24865 columns.

Aggregator did 17122 substitutions.
 Reduced MIP has 61933 rows, 124148 columns, and 263736 nonzeros.
 Reduced MIP has 0 binaries, 423 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
 Presolve time = 0,42 sec. (403,08 ticks)
 Found incumbent of value -1,3236249e+09 after 0,59 sec. (557,08 ticks)
 Tried aggregator 1 time.
 Detecting symmetries...
 Reduced MIP has 61933 rows, 124148 columns, and 263736 nonzeros.
 Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
 Presolve time = 0,20 sec. (148,19 ticks)
 MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
 MIP search method: dynamic search.
 Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
 Root relaxation solution time = 5,09 sec. (2643,90 ticks)

Nodes			Cuts/						
Node	Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap		
*	0+	0		-1,32362e+09	1,89956e+10		---		
*	0+	0		-2,46728e+08	1,89956e+10		---		
	0	0	1,70321e+08	384	-2,46728e+08	1,70321e+08	55	169,03%	
	0	0	1,70229e+08	384	-2,46728e+08	Cuts: 9926	3894	168,99%	
	0	0	1,70202e+08	384	-2,46728e+08	Cuts: 4029	6023	168,98%	
	0	0	1,70192e+08	384	-2,46728e+08	Cuts: 1162	6730	168,98%	

...

3854	3547	1,69929e+08	315	1,69362e+08	1,70186e+08	115904	0,49%	
------	------	-------------	-----	-------------	-------------	--------	-------	--

Elapsed time = 91,52 sec. (42963,24 ticks, tree = 132,59 MB, solutions = 3)

3954	3670	1,69922e+08	291	1,69362e+08	1,70186e+08	119151	0,49%	
4084	3760	1,69915e+08	242	1,69362e+08	1,70186e+08	122643	0,49%	

...

Performing restart 1

Repeating presolve.

Tried aggregator 1 time.

MIP Presolve modified 20998 coefficients.

Reduced MIP has 61933 rows, 124148 columns, and 247882 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,20 sec. (207,39 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 61933 rows, 124148 columns, and 247882 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,30 sec. (224,74 ticks)

Represolve time = 0,67 sec. (558,54 ticks)

4844	0	1,70083e+08	348	1,69362e+08	Cuts: 2360	248328	0,43%
------	---	-------------	-----	-------------	------------	--------	-------

...

17505	12200	1,70071e+08	315	1,69454e+08	1,70071e+08	577474	0,36%
-------	-------	-------------	-----	-------------	-------------	--------	-------

Mixed integer rounding cuts applied: 4912

Lift and project cuts applied: 34

Gomory fractional cuts applied: 61

Root node processing (before b&c):

Real time = 20,23 sec. (20542,57 ticks)

Parallel b&c, 8 threads:

Real time = 1180,42 sec. (896272,63 ticks)

Sync time (average) = 78,62 sec.

Wait time (average) = 0,09 sec.

Total (root+branch&cut) = 1200,66 sec. (916815,20 ticks)

Para 420 escenarios

Version identifier: 12.10.0.0 | 2019-11-26 | 843d4de2ae

CPXPARAM_TimeLimit 1200

Tried aggregator 2 times.

MIP Presolve eliminated 329384 rows and 47025 columns.

Aggregator did 34242 substitutions.

Reduced MIP has 123773 rows, 247828 columns, and 526536 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 423 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,88 sec. (812,29 ticks)

Found incumbent of value -2,1198509e+09 after 1,19 sec. (1119,77 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Detecting symmetries...

Reduced MIP has 123773 rows, 247828 columns, and 526536 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,44 sec. (299,25 ticks)

MIP emphasis: balance optimality and feasibility.

MIP search method: dynamic search.

Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.

Root relaxation solution time = 9,83 sec. (5148,09 ticks)

	Nodes		Cuts/					
	Node	Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap
*	0+	0			-2,11985e+09	1,89956e+10		996,08%
*	0+	0			-4,96955e+08	1,89956e+10		---
	0	0	1,67220e+08	384	-4,96955e+08	1,67220e+08	56	133,65%

...

3923	3822	1,65254e+08	15	1,63383e+08	1,67083e+08	188110	2,26%
3954	3838	1,65076e+08	13	1,63383e+08	1,67083e+08	188804	2,26%

...

4641	4032	1,66377e+08	278	1,65061e+08	1,67083e+08	209371	1,23%
------	------	-------------	-----	-------------	-------------	--------	-------

Performing restart 1

Repeating presolve.

Tried aggregator 1 time.

MIP Presolve modified 43447 coefficients.

Reduced MIP has 123773 rows, 247828 columns, and 494811 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,56 sec. (605,03 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 123773 rows, 247828 columns, and 494811 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 0,73 sec. (596,16 ticks)

Represolve time = 1,75 sec. (1647,46 ticks)

4642	0	1,66561e+08	320	1,65061e+08	Cuts: 2833	428174	0,91%
------	---	-------------	-----	-------------	------------	--------	-------

...

Mixed integer rounding cuts applied: 5844

Lift and project cuts applied: 61

Gomory fractional cuts applied: 74

Root node processing (before b&c):

```

Real time          = 46,95 sec. (46419,47 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
Real time          = 1153,97 sec. (1031554,90 ticks)
Sync time (average) = 53,63 sec.
Wait time (average) = 0,00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 1200,92 sec. (1077974,37 ticks)

```

Para 620 escenarios

```

Version identifier: 12.10.0.0 | 2019-11-26 | 843d4de2ae
CPXPARAM_TimeLimit          1200
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 486184 rows and 68162 columns.
Aggregator did 50579 substitutions.
Reduced MIP has 182636 rows, 365554 columns, and 776725 nonzeros.
Reduced MIP has 0 binaries, 423 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 1,36 sec. (1211,28 ticks)
Found incumbent of value -2,8801971e+09 after 1,84 sec. (1664,88 ticks)
Tried aggregator 1 time.
Detecting symmetries...
Reduced MIP has 182636 rows, 365554 columns, and 776725 nonzeros.
Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0,69 sec. (444,17 ticks)
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 26,77 sec. (11089,58 ticks)

```

Nodes		Cuts/					
Node	Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap

264 I. LOGS CPLEX DEL MODELO CON LA DEMANDA EN LOS C. D.

*	0+	0			-2,88020e+09	1,89956e+10		759,52%
*	0+	0			-7,37303e+08	1,89956e+10		---
	0	0	1,60395e+08	394	-7,37303e+08	1,60395e+08	87	121,75%

...

4052	3897	1,58275e+08	14	1,57629e+08	1,60216e+08	215721	1,64%
4082	3912	1,60215e+08	310	1,57629e+08	1,60216e+08	223325	1,64%

...

Performing restart 1

Repeating presolve.

Tried aggregator 1 time.

MIP Presolve modified 66297 coefficients.

Reduced MIP has 182636 rows, 365554 columns, and 730090 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 1,06 sec. (1185,09 ticks)

Tried aggregator 1 time.

Reduced MIP has 182636 rows, 365554 columns, and 730090 nonzeros.

Reduced MIP has 0 binaries, 470 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.

Presolve time = 1,28 sec. (1086,13 ticks)

Represolve time = 2,84 sec. (2717,87 ticks)

5225	0	1,60212e+08	323	1,57772e+08	Cuts: 2382	581753	1,55%
------	---	-------------	-----	-------------	------------	--------	-------

Mixed integer rounding cuts applied: 8381

Lift and project cuts applied: 18

Gomory fractional cuts applied: 60

Root node processing (before b&c):

Real time = 88,97 sec. (75076,11 ticks)

Parallel b&c, 8 threads:

Real time = 1111,23 sec. (789748,20 ticks)

Sync time (average) = 131,08 sec.

Wait time (average) = 0,00 sec.

Total (root+branch&cut) = 1200,20 sec. (864824,30 ticks)

Apéndice J

Campana sojera 2013/14

A partir de la información suministrada por el Ministerio de Agricultura Minería y Pesca de la Nación argentina se han obtenido los datos correspondientes a las localidades en las cuales se ha sembrado soja durante la campaña 2013/2014, que se pueden observar en el Cuadro [J.1](#)

CUADRO (J.1). Datos por Localidad

Provincia	Localidad	Sembrado (ha)	Cosechado (ha)	Producción (tn)
Bs. As.	25 DE MAYO	107100	93100	237910
Bs. As.	9 DE JULIO	189700	186300	718200
Bs. As.	ADOLFO ALSINA	78000	78000	76800
Bs. As.	ALBERTI	61050	58950	198300
Bs. As.	ARRECIFES	74350	74200	266680
Bs. As.	AYACUCHO	34280	31720	84660
Bs. As.	AZUL	120600	119600	187400
Bs. As.	BALCARCE	119300	118100	208710
Bs. As.	BARADERO	57850	57750	202550
Bs. As.	BOLIVAR	111200	111200	261200
Bs. As.	BRAGADO	122660	118340	420358
Bs. As.	BRANDSEN	6400	4800	11170
Bs. As.	CAMPANA	6150	6100	20305
Bs. As.	CANUELAS	21500	21500	60100
Bs. As.	CAPITAN SARMIENTO	38250	38150	139630
Bs. As.	CARLOS CASARES	93700	89300	223000
Bs. As.	CARLOS TEJEDOR	95629	89829	199505
Bs. As.	CARMEN DE ARECO	42500	41000	168700
Bs. As.	CASTELLI	11380	10820	27546
Bs. As.	CHACABUCO	149000	146000	617900
Bs. As.	CHASCOMUS	34700	34700	99530
Bs. As.	CHIVILCOY	100580	99020	365560
Bs. As.	COLON	63450	63300	244945
Bs. As.	CORONEL DORREGO	78200	69400	79560

Bs. As.	CORONEL PRINGLES	47400	38330	51262
Bs. As.	CORONEL SUAREZ	116000	114000	156400
Bs. As.	DAIREAUX	88500	88500	208500
Bs. As.	DOLORES	3620	3380	8788
Bs. As.	EXALTACION DE LA CRUZ	12400	12400	42135
Bs. As.	FLORENTINO AMEGHINO	72300	62700	175790
Bs. As.	GENERAL ALVARADO	68800	68300	107130
Bs. As.	GENERAL ALVEAR	38000	38000	83000
Bs. As.	GENERAL ARENALES	123800	122300	502240
Bs. As.	GENERAL BELGRANO	27700	18000	42570
Bs. As.	GENERAL GUIDO	3500	3500	8330
Bs. As.	GENERAL LAMADRID	44000	43500	70450
Bs. As.	GENERAL LAS HERAS	4500	4500	13520
Bs. As.	GENERAL LAVALLE	20150	2050	5200
Bs. As.	GENERAL MADARIAGA	2050	19250	54975
Bs. As.	GENERAL PAZ	3450	2950	7785
Bs. As.	GENERAL PINTO	97600	80600	256920
Bs. As.	GENERAL PUEYRREDON	28500	28250	46345
Bs. As.	GENERAL RODRIGUEZ	2500	2500	8140
Bs. As.	GENERAL VIAMONTE	99090	86090	296852
Bs. As.	GENERAL VILLEGAS	284550	258550	695030
Bs. As.	GONZALEZ CHAVES	110100	98700	122420
Bs. As.	GUAMINI	88000	87880	171056
Bs. As.	HIPOLITO YRIGOYEN	57500	57500	132500
Bs. As.	JUAREZ	101700	100700	162260
Bs. As.	JUNIN	157000	154000	587400
Bs. As.	LAPRIDA	11400	10300	12620
Bs. As.	LAS FLORES	58100	50600	129510
Bs. As.	LEANDRO N ALEM	92300	80700	290740
Bs. As.	LINCOLN	223900	203900	628540
Bs. As.	LOBERIA	183400	181900	285400
Bs. As.	LOBOS	57200	50800	125190
Bs. As.	LUJAN	14700	13700	41970
Bs. As.	MAGDALENA	6100	4500	11080
Bs. As.	MAIPU	13950	13450	38140
Bs. As.	MAR CHIQUITA	19000	18400	45280
Bs. As.	MARCOS PAZ	8600	8000	23320
Bs. As.	MERCEDES	23400	21600	50850
Bs. As.	MONTE	46700	41300	106440
Bs. As.	NAVARRO	55100	48000	120870
Bs. As.	NECOCHEA	219000	198000	365200

Bs. As.	OLAVARRIA	80000	80000	147500
Bs. As.	PATAGONES	150	150	270
Bs. As.	PEHUAJO	188648	182248	411611
Bs. As.	PELLEGRINI	39000	39000	77700
Bs. As.	PERGAMINO	193650	193450	775645
Bs. As.	PILA	10800	10800	27360
Bs. As.	PILAR	2450	1950	6070
Bs. As.	PUAN	1200	1100	850
Bs. As.	PUNTA INDIO	2050	1350	2735
Bs. As.	RAMALLO	65850	65750	236735
Bs. As.	RAUCH	18780	18220	48638
Bs. As.	RIVADAVIA	197015	190015	557247
Bs. As.	ROJAS	131900	129900	541160
Bs. As.	ROQUE PEREZ	59700	48700	120510
Bs. As.	SAAVEDRA	25400	25200	30100
Bs. As.	SALADILLO	80600	70600	182080
Bs. As.	SALLIQUELO	25000	25000	42600
Bs. As.	SALTO	108000	107850	436995
Bs. As.	SAN ANDRES DE GILES	54600	53100	216750
Bs. As.	SAN ANTONIO DE ARECO	51250	51150	179090
Bs. As.	SAN CAYETANO	101900	87500	121390
Bs. As.	SAN NICOLAS	42150	42100	153960
Bs. As.	SAN PEDRO	59350	59250	212445
Bs. As.	SAN VICENTE	2550	2050	5260
Bs. As.	SUIPACHA	24200	23400	55840
Bs. As.	TANDIL	157300	155900	268590
Bs. As.	TAPALQUE	450	450	900
Bs. As.	TORDILLO	1500	1500	3600
Bs. As.	TORNQUIST	9200	6200	6100
Bs. As.	TRENQUE LAUQUEN	190167	181567	397751
Bs. As.	TRES ARROYOS	225300	205300	292840
Bs. As.	TRES LOMAS	37000	37000	74200
Bs. As.	VILLARINO	200	200	360
Bs. As.	ZARATE	27500	27450	96125
Catamarca	CAPAYAN	200	130	195
Catamarca	EL ALTO	3400	2850	5130
Catamarca	SANTA ROSA	11500	10550	20045
Chaco	12 DE OCTUBRE	70000	70000	168000
Chaco	2 DE ABRIL	44000	43250	103800
Chaco	9 DE JULIO	50000	48500	135800
Chaco	ALMIRANTE BROWN	130000	124700	286810

Chaco	BERMEJO	1300	1250	2750
Chaco	CHACABUCO	63000	62300	168210
Chaco	COMANDANTE FERNANDEZ	32000	30900	69525
Chaco	COMANDANTE LUIS FONTANA	17000	15980	38352
Chaco	FRAY JUSTO STA MA DE ORO	12000	11350	23835
Chaco	GENERAL BELGRANO	45000	45000	108000
Chaco	GENERAL GUEMES	7500	7200	15120
Chaco	GENERAL SAN MARTIN	3500	3380	7098
Chaco	INDEPENDENCIA	52000	50500	116150
Chaco	MAIPU	23000	22300	46830
Chaco	O' HIGGINS	32000	31050	77625
Chaco	QUITILIPÍ	4500	4380	6132
Chaco	SAN LORENZO	1500	1450	4060
Chaco	SAN FERNANDO	1800	1680	3192
Chaco	SARGENTO CABRAL	1200	1160	3248
Córdoba	CALAMUCHITA	69000	69000	178600
Córdoba	CAPITAL	4700	4700	16330
Córdoba	COLON	118000	118000	377900
Córdoba	GENERAL ROCA	417000	413500	1132600
Córdoba	GENERAL SAN MARTIN	190000	189300	627680
Córdoba	ISCHILIN	30000	30000	90000
Córdoba	JUAREZ CELMAN	283500	283500	677460
Córdoba	MARCOS JUAREZ	594100	574600	2003400
Córdoba	POCHO	800	800	2000
Córdoba	PTE ROQUE SAENZ PENA	330000	328500	980750
Córdoba	RÍO CUARTO	817300	817300	2108980
Córdoba	RÍO PRIMERO	237000	237000	690900
Córdoba	RÍO SECO	50000	50000	150000
Córdoba	RÍO SEGUNDO	276660	276060	914931
Córdoba	SAN ALBERTO	900	900	2160
Córdoba	SAN JAVIER	6500	6500	19200
Córdoba	SAN JUSTO	497000	467000	1529200
Córdoba	SANTA MARIA	118500	118500	284400
Córdoba	SOBREMUNTE	6500	6500	16250
Córdoba	TERCERO ARRIBA	286000	278500	857350
Córdoba	TOTAL	77000	77000	231000
Córdoba	TULUMBA	63000	63000	157900
Córdoba	UNION	579300	555200	1868680
Entre Ríos	COLON	41000	40930	94139
Entre Ríos	CONCORDIA	34000	34000	81000
Entre Ríos	DIAMANTE	71400	71400	218160

Entre Ríos	FEDERACION	17000	17000	40000
Entre Ríos	FEDERAL	41000	41000	105000
Entre Ríos	FELICIANO	16000	16000	35200
Entre Ríos	GUALEGUAY	115500	115100	311301
Entre Ríos	GUALEGUAYCHU	225000	224450	574010
Entre Ríos	LA AZ	135500	135500	391800
Entre Ríos	NOGOYA	140000	139700	367250
Entre Ríos	PARANÁ	190500	190500	552100
Entre Ríos	SAN SALVADOR	27500	27320	62836
Entre Ríos	TALA	74000	73820	188800
Entre Ríos	URUGUAY	151000	150650	385735
Entre Ríos	VICTORIA	104000	103800	289860
Entre Ríos	VILLAGUAY	121500	121230	277412
Jujuy	DR. MANUEL BELGRANO	80	80	184
Jujuy	EL CARMEN	590	590	1357
Jujuy	LEDESMA	250	250	600
Jujuy	PALPALA	350	350	840
Jujuy	SAN ANTONIO	740	740	1776
Jujuy	SAN PEDRO	540	540	1350
Jujuy	SANTA BARBARA	4150	4150	10790
La Pampa	ATREUCO	21000	21000	29500
La Pampa	CAPITAL	16000	16000	24200
La Pampa	CATRILO	38500	38500	61900
La Pampa	CHAPALEUFU	110200	108000	270780
La Pampa	CONELO	37700	35800	45700
La Pampa	GUATRACHE	2000	1500	1950
La Pampa	MARACO	84100	82400	225200
La Pampa	QUEMU QUEMU	61300	60100	150860
La Pampa	RANCUL	67800	64400	94650
La Pampa	REALICÓ	50700	48200	76280
La Pampa	TOAY	2000	2000	2600
La Pampa	TRENEL	24300	23100	31700
La Pampa	UTRACAN	5500	5500	7050
Misiones	25 DE MAYO	600	600	1500
Misiones	CAINGUAS	40	40	100
Misiones	GENERAL BELGRANO	100	100	270
Misiones	GUARANI	420	420	1092
Misiones	LEANDRO N ALEM	30	30	69
Misiones	OBERA	30	30	69
Misiones	SAN JAVIER	30	30	69
Misiones	SAN PEDRO	50	50	125

Salta	ANTA	258000	247680	445824
Salta	CANDELARIA	1650	1650	2970
Salta	CAPITAL	2800	2800	6720
Salta	CERRILLOS	800	800	1840
Salta	CHICOANA	300	300	720
Salta	GENERAL GUEMES	3150	3150	6930
Salta	GRAL JOSE DE SAN MARTIN	120000	113105	214900
Salta	GUACHIPAS	25	25	63
Salta	LA VIÑA	120	120	288
Salta	METAN	48500	47045	79977
Salta	ORAN	16300	15700	29830
Salta	RIVADAVIA	1120	1085	1953
Salta	ROSARIO DE LA FRONTERA	39500	38315	76630
Salta	ROSARIO DE LERMA	140	140	364
San Luis	AYACUCHO	4000	4000	14000
San Luis	CHACABUCO	30400	30400	63600
San Luis	CORONEL PRINGLES	44400	44400	115160
San Luis	GENERAL PEDERNERA	230500	230500	552850
San Luis	GOBERNADOR DUPUY	15000	15000	24000
San Luis	JUNIN	1280	1280	3520
San Luis	LA CAPITAL	27150	27150	70485
San Luis	LIBERTDOR GRAL SAN MAR-	2000	2000	5200
	TIN			
Sta Fe	9 DE JULIO	110000	110000	307000
Sta Fe	BELGRANO	167887	167887	563800
Sta Fe	CASEROS	265000	260200	855860
Sta Fe	CASTELLANOS	285000	271000	890500
Sta Fe	CONSTITUCION	230000	226400	724480
Sta Fe	GARAY	4000	4000	11200
Sta Fe	GENERAL LOPEZ	610000	603500	1726600
Sta Fe	GENERAL OBLIGADO	95500	94500	204020
Sta Fe	IRIONDO	205663	205663	668347
Sta Fe	LA CAPITAL	48000	46500	134150
Sta Fe	LAS COLONIAS	235000	230000	721600
Sta Fe	ROSARIO	102000	100000	323500
Sta Fe	SAN CRISTOBAL	98000	95000	268500
Sta Fe	SAN JAVIER	11000	11000	24700
Sta Fe	SAN JERONIMO	177291	177291	592246
Sta Fe	SAN JUSTO	150000	148500	426850
Sta Fe	SAN LORENZO	146000	143500	459200
Sta Fe	SAN MARTIN	288427	288427	992481

Sta Fe	VERA	26000	26000	63800
Sgo. del Estero	AGUIRRE	54000	54000	156600
Sgo. del Estero	ALBERDI	90000	90000	261000
Sgo. del Estero	AVELLANEDA	3500	3500	9450
Sgo. del Estero	BANDA	4000	4000	8000
Sgo. del Estero	BELGRANO	109800	109800	318420
Sgo. del Estero	CAPITAL	4000	4000	10000
Sgo. del Estero	CHOYA	8000	8000	17600
Sgo. del Estero	COPO	7600	7600	21280
Sgo. del Estero	FIGUEROA	1750	1750	4375
Sgo. del Estero	GENERAL TABOADA	160000	160000	432000
Sgo. del Estero	GUASAYAN	8000	8000	17600
Sgo. del Estero	J. F. IBARRA (ex MATARA)	2000	2000	5000
Sgo. del Estero	JIMENEZ	73000	73000	197100
Sgo. del Estero	LORETO	51300	51300	148770
Sgo. del Estero	MITRE	20000	20000	50000
Sgo. del Estero	MORENO	230000	230000	667000
Sgo. del Estero	PELLEGRINI	80000	80000	240000
Sgo. del Estero	RÍO HONDO	8000	8000	17600
Sgo. del Estero	RIVADAVIA	47500	47500	137750
Sgo. del Estero	ROBLES	3000	3000	7500
Sgo. del Estero	SAN MARTIN	1500	1500	3300
Sgo. del Estero	SILIPICA	3000	3000	6600
Tucumán	ALBERDI	2400	2400	6240
Tucumán	BURRUYACÚ	75000	74950	149900
Tucumán	CHICLIGASTA	2100	1950	5265
Tucumán	CRUZ ALTA	50000	49940	104874
Tucumán	FAMAILLA	1250	1250	2875
Tucumán	GRANEROS	22000	21120	35904
Tucumán	LA COCHA	19000	17750	33725
Tucumán	LEALES	30000	29850	62685
Tucumán	LULES	70	70	175
Tucumán	MONTEROS	580	580	1218
Tucumán	RÍO CHICO	1450	1450	3045
Tucumán	SIMOCA	3500	3450	6555
Tucumán	TAFI VIEJO	1300	1300	2990
Tucumán	YERBA BUENA	250	250	550

El Cuadro [J.2](#) presenta la información resumida por cada una de las provincias.

CUADRO (J.2). Datos agregados por provincia

Provincia	Sembrado	Cosechado	Producido
BUENOS AIRES	6767899	6428159	17143374
CATAMARCA	15100	13530	25370
CHACO	591300	576330	1384537
CÓRDOBA	5052760	4965360	14917671
ENTRE RÍOS	1504900	1502400	3974603
JUJUY	6700	6700	16897
LA PAMPA	521100	506500	1022370
MISIONES	1300	1300	3294
SALTA	492405	471915	869009
SAN LUIS	354730	354730	848815
SANTA FE	3254768	3209368	9958834
SANTIAGO DEL ESTERO	969950	969950	2736945
TUCUMÁN	208900	206310	416001

En los gráficos de la Figura [J.1](#) se puede observar la influencia de las provincias en la producción de soja, en dónde cerca el 80 % de la siembra / cosecha / producción se concentra, prácticamente en tres provincias.

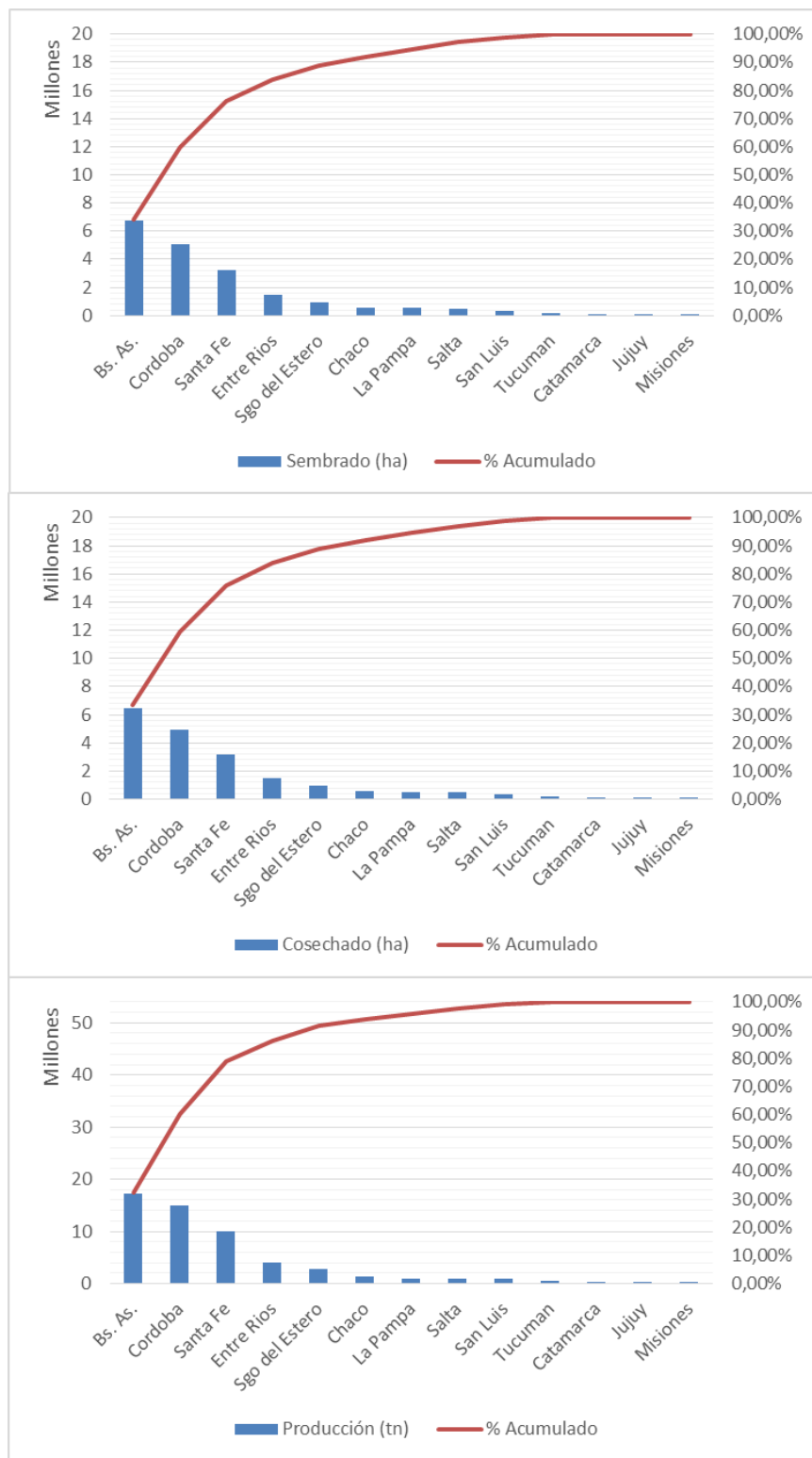


FIGURA (J.1). Campaña 2013/14

Apéndice K

Coordenadas Geográficas de las Localidades

En este apéndice se reportan las coordenadas geográficas obtenidas del servicio de google maps (<http://maps.google.com>).

Provincia	Localidad	Latitud	Longitud
Bs. As.	25 DE MAYO	-35.433651	-60.166618
Bs. As.	9 DE JULIO	-35.445957	-60.883377
Bs. As.	ADOLFO ALSINA	-37.247125	-63.014758
Bs. As.	ALBERTI	-35.033733	-60.278553
Bs. As.	ARRECIFES	-34.063877	-60.103489
Bs. As.	AYACUCHO	-37.150269	-58.482971
Bs. As.	AZUL	-36.774967	-59.854038
Bs. As.	BALCARCE	-37.846407	-58.255458
Bs. As.	BARADERO	-33.808876	-59.504684
Bs. As.	BOLIVAR	-36.228394	-61.107643
Bs. As.	BRAGADO	-35.119911	-60.481426
Bs. As.	BRANDSEN	-35.173893	-58.233971
Bs. As.	CABA	-34.603684	-58.381559
Bs. As.	CAMPANA	-34.167481	-58.952640
Bs. As.	CANUELAS	-35.049142	-58.759505
Bs. As.	CAPITAN SARMIENTO	-34.168984	-59.789288
Bs. As.	CARLOS CASARES	-35.623028	-61.360367
Bs. As.	CARLOS TEJEDOR	-35.392647	-62.420654
Bs. As.	CARMEN DE ARECO	-34.380669	-59.822327
Bs. As.	CASTELLI	-36.088322	-57.806213
Bs. As.	CHACABUCO	-34.635933	-60.465122
Bs. As.	CHASCOMUS	-35.579180	-58.013688
Bs. As.	CHIVILCOY	-34.897240	-60.018837
Bs. As.	COLON	-33.896531	-61.100038
Bs. As.	CORONEL DORREGO	-38.719437	-61.285458
Bs. As.	CORONEL PRINGLES	-37.985420	-61.354038
Bs. As.	CORONEL SUAREZ	-37.455952	-61.930725
Bs. As.	DAIREAUX	-36.600948	-61.748661
Bs. As.	DOLORES	-36.315232	-57.675311

Bs. As.	EXALTACION DE LA CRUZ	-34.291844	-59.102020
Bs. As.	FLORENTINO AMEGHINO	-34.816667	-62.450000
Bs. As.	GENERAL ALVARADO	-38.263348	-57.867127
Bs. As.	GENERAL ALVEAR	-36.014896	-60.008644
Bs. As.	GENERAL ARENALES	-34.302704	-61.303791
Bs. As.	GENERAL BELGRANO	-35.767143	-58.495995
Bs. As.	GENERAL GUIDO	-36.639423	-57.790028
Bs. As.	GENERAL LAMADRID	-37.247643	-61.260616
Bs. As.	GENERAL LAS HERAS	-34.886726	-58.984108
Bs. As.	GENERAL LAVALLE	-36.400452	-56.966862
Bs. As.	GENERAL MADARIAGA	-34.685900	-58.348070
Bs. As.	GENERAL PAZ	-35.397156	-58.412720
Bs. As.	GENERAL PINTO	-34.766232	-61.883240
Bs. As.	GENERAL PUEYRREDON	-37.947529	-57.779994
Bs. As.	GENERAL RODRIGUEZ	-34.602089	-58.952129
Bs. As.	GENERAL VIAMONTE	-35.001045	-61.035626
Bs. As.	GENERAL VILLEGAS	-35.032650	-63.017578
Bs. As.	GONZALEZ CHAVES	-38.034672	-60.100712
Bs. As.	GUAMINI	-37.012543	-62.416496
Bs. As.	HIPOLITO YRIGOYEN	-36.227680	-61.653805
Bs. As.	JUAREZ	-37.677811	-59.807758
Bs. As.	JUNIN	-34.588550	-60.949554
Bs. As.	LAPRIDA	-37.545429	-60.798710
Bs. As.	LAS FLORES	-36.016014	-59.096985
Bs. As.	LEANDRO N ALEM	-34.520554	-61.391876
Bs. As.	LINCOLN	-34.868449	-61.529091
Bs. As.	LOBERIA	-38.164089	-58.781715
Bs. As.	LOBOS	-35.185361	-59.097528
Bs. As.	LUJAN	-34.565731	-59.117432
Bs. As.	MAGDALENA	-35.076500	-57.517536
Bs. As.	MAIPU	-36.865204	-57.877129
Bs. As.	MAR CHIQUITA	-37.742463	-57.430460
Bs. As.	MARCOS PAZ	-34.782336	-58.837780
Bs. As.	MERCEDES	-34.654602	-59.428413
Bs. As.	MONTE	-35.421239	-58.828961
Bs. As.	NAVARRO	-35.003372	-59.275589
Bs. As.	NECOCHEA	-38.554497	-58.739609
Bs. As.	OLAVARRIA	-36.892090	-60.314941
Bs. As.	PATAGONES	-40.051010	-63.014758
Bs. As.	PEHUAJO	-35.811001	-61.895676
Bs. As.	PELLEGRINI	-36.268189	-63.161537

Bs. As.	PERGAMINO	-33.888142	-60.569336
Bs. As.	PILA	-36.001762	-58.140404
Bs. As.	PILAR	-34.455906	-58.908329
Bs. As.	PUAN	-37.544727	-62.767090
Bs. As.	PUNTA INDIO	-35.274349	-57.260738
Bs. As.	RAMALLO	-33.486458	-60.004910
Bs. As.	RAUCH	-36.774918	-59.089787
Bs. As.	RIVADAVIA	-35.488991	-62.973774
Bs. As.	ROJAS	-34.200440	-60.732422
Bs. As.	ROQUE PEREZ	-35.399044	-59.332752
Bs. As.	SAAVEDRA	-34.550000	-58.483333
Bs. As.	SALADILLO	-35.636574	-59.778618
Bs. As.	SALLIQUELO	-36.750717	-62.960095
Bs. As.	SALTO	-34.293434	-60.250423
Bs. As.	SAN ANDRES DE GILES	-34.446419	-59.443073
Bs. As.	SAN ANTONIO DE ARECO	-34.249882	-59.466251
Bs. As.	SAN CAYETANO	-38.345387	-59.613770
Bs. As.	SAN NICOLAS	-33.333466	-60.211029
Bs. As.	SAN PEDRO	-33.682003	-59.665165
Bs. As.	SAN VICENTE	-35.023339	-58.423546
Bs. As.	SUIPACHA	-34.771221	-59.684254
Bs. As.	TANDIL	-37.317810	-59.150391
Bs. As.	TAPALQUE	-36.355545	-60.023655
Bs. As.	TORDILLO	-36.398363	-57.236696
Bs. As.	TORNQUIST	-38.098736	-62.223625
Bs. As.	TRENQUE LAUQUEN	-35.973279	-62.732597
Bs. As.	TRES ARROYOS	-38.376312	-60.278130
Bs. As.	TRES LOMAS	-36.458382	-62.858833
Bs. As.	VILLARINO	-39.034890	-62.638352
Bs. As.	ZARATE	-34.098808	-59.032291
Catamarca	CAPAYAN	-28.766670	-66.066681
Catamarca	EL ALTO	-28.300000	-65.366667
Catamarca	SANTA ROSA	-28.034361	-67.615356
Chaco	12 DE OCTUBRE	-27.291273	-61.420202
Chaco	2 DE ABRIL	-27.460768	-59.016190
Chaco	9 DE JULIO	-26.959166	-61.280200
Chaco	ALMIRANTE BROWN	-25.845035	-61.513604
Chaco	BERMEJO	-24.376170	-62.055070
Chaco	CHACABUCO	-27.114871	-61.303525
Chaco	COMANDANTE FERNANDEZ	-26.738727	-60.489229

Chaco	COMANDANTE LUIS FONTANA	-27.416380	-59.032291
Chaco	FRAY JUSTO STA MA DE ORO	-27.806663	-61.420202
Chaco	GENERAL BELGRANO	-26.831776	-61.093721
Chaco	GENERAL GUEMES	-25.152261	-61.513604
Chaco	GENERAL SAN MARTIN	-26.540829	-59.347206
Chaco	INDEPENDENCIA	-26.748432	-60.721436
Chaco	MAIPU	-26.265805	-60.674965
Chaco	O'HIGGINS	-27.294841	-60.674965
Chaco	QUITILIPÍ	-26.870927	-60.215375
Chaco	SAN FERNANDO	-27.748980	-59.012368
Chaco	SAN LORENZO	-28.130219	-58.766201
Chaco	SARGENTO CABRAL	-26.812044	-59.518155
Córdoba	CALAMUCHITA	-32.271416	-64.621428
Córdoba	CAPITAL	-31.398930	-64.182129
Córdoba	COLON	-31.168957	-64.242480
Córdoba	GENERAL ROCA	-32.729763	-61.914524
Córdoba	GENERAL SAN MARTIN	-32.485266	-63.297505
Córdoba	ISCHILIN	-30.583330	-64.349999
Córdoba	JUAREZ CELMAN	-31.273371	-64.166328
Córdoba	MARCOS JUAREZ	-32.693607	-62.102676
Córdoba	POCHO	-31.483330	-65.266670
Córdoba	PTE ROQUE SAENZ PENA	-31.402491	-64.183212
Córdoba	RÍO CUARTO	-33.132019	-64.349670
Córdoba	RÍO PRIMERO	-31.330494	-63.620564
Córdoba	RÍO SECO	-29.938175	-63.297505
Córdoba	RÍO SEGUNDO	-31.651802	-63.912396
Córdoba	SAN ALBERTO	-31.670676	-65.000854
Córdoba	SAN JAVIER	-32.033329	-65.050011
Córdoba	SAN JUSTO	-31.026149	-62.450415
Córdoba	SANTA MARIA	-31.606331	-62.427410
Córdoba	SOBREMUNTE	-29.755708	-64.053200
Córdoba	TERCERO ARRIBA	-32.233643	-63.675056
Córdoba	TOTAL	-30.816670	-63.716671
Córdoba	TULUMBA	-30.394119	-64.120590
Córdoba	UNION	-32.249255	-62.638352
Entre Ríos	COLON	-32.224933	-58.144714
Entre Ríos	CONCORDIA	-31.391848	-58.017061
Entre Ríos	DIAMANTE	-32.069710	-60.637871
Entre Ríos	FEDERACION	-30.985036	-57.919842

Entre Ríos	FEDERAL	-30.951229	-58.798828
Entre Ríos	FELICIANO	-30.334367	-58.645837
Entre Ríos	GUALEGUAY	-33.151241	-59.334412
Entre Ríos	GUALEGUAYCHU	-33.007778	-58.511167
Entre Ríos	LA PAZ	-30.758970	-59.639278
Entre Ríos	NOGOYA	-32.399216	-59.787740
Entre Ríos	PARANÁ	-31.741320	-60.511547
Entre Ríos	SAN SALVADOR	-31.615910	-58.499451
Entre Ríos	TALA	-32.346078	-59.380011
Entre Ríos	URUGUAY	-32.517564	-59.104176
Entre Ríos	VICTORIA	-32.753839	-60.303732
Entre Ríos	VILLAGUAY	-31.867701	-59.026922
Jujuy	DR. MANUEL BELGRANO	-24.185786	-65.299477
Jujuy	EL CARMEN	-24.389346	-65.261621
Jujuy	LEDESMA	-23.834219	-64.791899
Jujuy	PALPALA	-24.264836	-65.211778
Jujuy	SAN ANTONIO	-24.370342	-65.331836
Jujuy	SAN PEDRO	-24.231657	-64.867871
Jujuy	SANTA BARBARA	-23.600000	-65.066680
La Pampa	ATREUCO	-37.133331	-63.816662
La Pampa	CAPITAL	-36.497349	-64.242480
La Pampa	CATRILO	-36.408073	-63.419819
La Pampa	CHAPALEUFU	-35.227042	-63.675056
La Pampa	CONELO	-37.895659	-65.095779
La Pampa	GUATRACHE	-37.668713	-63.541538
La Pampa	MARACO	-35.716611	-63.675056
La Pampa	QUEMU QUEMU	-36.048889	-63.550411
La Pampa	RANCUL	-35.069679	-64.681969
La Pampa	REALICÓ	-35.038017	-64.246574
La Pampa	TOAY	-36.674059	-64.379369
La Pampa	TRENEL	-35.700069	-64.132690
La Pampa	UTRACAN	-37.284851	-64.563911
Misiones	25 DE MAYO	-27.377190	-54.743454
Misiones	CAINGUAS	-27.145657	-54.873122
Misiones	GENERAL BELGRANO	-26.076430	-53.997677
Misiones	GUARANI	-27.523972	-55.160137
Misiones	LEANDRO N ALEM	-27.604435	-55.323849
Misiones	OBERA	-27.486780	-55.120333
Misiones	SAN JAVIER	-27.871956	-55.138908
Misiones	SAN PEDRO	-26.630859	-54.113159
Salta	ANTA	-24.916670	-64.466667

Salta	CANDELARIA	-26.153023	-65.048313
Salta	CAPITAL	-24.782932	-65.412155
Salta	CERRILLOS	-24.894976	-65.481003
Salta	CHICOANA	-25.103760	-65.536201
Salta	GENERAL GUEMES	-24.667258	-65.050065
Salta	GRAL JOSE DE SAN MARTIN	-22.786440	-63.769538
Salta	GUACHIPAS	-25.516670	-65.533340
Salta	LA VIÑA	-25.450389	-65.582106
Salta	METAN	-25.494225	-64.972130
Salta	ORAN	-23.138830	-64.318558
Salta	RIVADAVIA	-24.183661	-62.882992
Salta	ROSARIO DE LA FRONTERA	-25.798651	-64.967651
Salta	ROSARIO DE LERMA	-24.982910	-65.582901
San Luis	AYACUCHO	-32.149240	-66.522390
San Luis	CHACABUCO	-32.731247	-65.190731
San Luis	CORONEL PRINGLES	-33.227665	-65.951199
San Luis	GENERAL PEDERNERA	-33.927079	-65.665857
San Luis	GOBERNADOR DUPUY	-35.259925	-65.665857
San Luis	JUNIN	-32.129886	-65.570785
San Luis	LA CAPITAL	-33.302220	-66.336798
San Luis	LIBERTDOR GRAL SAN MARTIN	-32.577778	-65.675000
Santa Fe	9 DE JULIO	-28.940316	-61.513604
Santa Fe	BELGRANO	-32.940256	-60.712654
Santa Fe	CASEROS	-33.249303	-61.607058
Santa Fe	CASTELLANOS	-30.974859	-61.513604
Santa Fe	CONSTITUCION	-33.602204	-61.047136
Santa Fe	GARAY	-31.049585	-60.118480
Santa Fe	GENERAL LOPEZ	-34.059615	-61.887732
Santa Fe	GENERAL OBLIGADO	-28.729529	-59.564237
Santa Fe	IRIONDO	-32.660212	-61.233559
Santa Fe	LA CAPITAL	-31.632389	-60.699459
Santa Fe	LAS COLONIAS	-31.555313	-61.140320
Santa Fe	ROSARIO	-32.950741	-60.666500
Santa Fe	SAN CRISTOBAL	-30.306904	-61.237816
Santa Fe	SAN JAVIER	-30.583191	-59.949638
Santa Fe	SAN JERONIMO	-32.115803	-61.047136
Santa Fe	SAN JUSTO	-30.789438	-60.591022
Santa Fe	SAN LORENZO	-32.750240	-60.732422
Santa Fe	SAN MARTIN	-31.852100	-61.572418
Santa Fe	VERA	-29.465330	-60.216061

Sgo. del Estero	AGUIRRE	-29.537050	-62.266029
Sgo. del Estero	ALBERDI	-26.504837	-63.014758
Sgo. del Estero	AVELLANEDA	-28.427056	-63.486204
Sgo. del Estero	BANDA	-27.784420	-64.267281
Sgo. del Estero	BELGRANO	-25.875549	-63.890991
Sgo. del Estero	CAPITAL	-27.784420	-64.267281
Sgo. del Estero	CHOYA	-28.501280	-64.866028
Sgo. del Estero	COPO	-26.002374	-62.262663
Sgo. del Estero	FIGUEROA	-27.644329	-63.491131
Sgo. del Estero	GENERAL TABOADA	-28.530176	-62.356516
Sgo. del Estero	GUASAYAN	-27.998092	-64.811084
Sgo. del Estero	J. F. IBARRA (ex MATARA)	-28.105341	-63.191814
Sgo. del Estero	JIMENEZ	-27.011660	-64.242480
Sgo. del Estero	LORETO	-28.300000	-64.200000
Sgo. del Estero	MITRE	-29.642768	-62.732388
Sgo. del Estero	MORENO	-27.389036	-62.262663
Sgo. del Estero	PELLEGRINI	-26.028162	-64.147824
Sgo. del Estero	RÍO HONDO	-27.584679	-64.953438
Sgo. del Estero	RIVADAVIA	-30.070771	-62.356516
Sgo. del Estero	ROBLES	-27.933331	-64.133331
Sgo. del Estero	SAN MARTIN	-27.566670	-64.283340
Sgo. del Estero	SILIPICA	-28.100000	-64.133331
Tucumán	ALBERDI	-27.590168	-65.784727
Tucumán	BURRUYACÚ	-26.499424	-64.741943
Tucumán	CHICLIGASTA	-27.263788	-65.808505
Tucumán	CRUZ ALTA	-26.928637	-64.953401
Tucumán	FAMAILLA	-27.056055	-65.402168
Tucumán	GRANEROS	-27.649839	-65.440071
Tucumán	LA COCHA	-27.771767	-65.586800
Tucumán	LEALES	-27.200001	-65.300011
Tucumán	LULES	-26.925751	-65.338036
Tucumán	MONTEROS	-27.163958	-65.496330
Tucumán	RÍO CHICO	-27.458933	-65.614860
Tucumán	SIMOCA	-27.262444	-65.354820
Tucumán	TAFI VIEJO	-26.732479	-65.267029
Tucumán	YERBA BUENA	-26.816670	-65.316681

Diversos planes de producción

En esta sección se presentan los cuadros con los valores de los lotes de producción que sugieren realizar los resultados obtenidos mediante CPLEX con un tiempo límite de procesamiento de 20 minutos (columnas CP) comparados contra los valores obtenidos para esa variable en la heurística de dos fases al final de la primer fase (columnas F1) y al final de la segunda fase (columnas F2).

Los cuadros se dividen por la porción de demanda que se busca satisfacer (Buenos Aires, centro, partida y completo) y las tres configuraciones de centros de distribución que se han estado planteando (6, 8 y 10).

Se muestran ternas de columnas para las ejecuciones que contienen diferente cantidad de escenarios, en uno las 8 ejecuciones que comprenden las cantidades de escenarios entre 10 y 80 a intervalos de 10 y en el otro cuadro las ejecuciones de 90 escenarios o más.

Por ejemplo, en el renglón del período 27 en el Cuadro [L.1](#) se expone que el modelo entero resuelto por CPLEX para 40 escenarios sugiere que se realicen dos lotes de producción en cambio la heurística de dos fases en su primer fase no sugiere la fabricación en tanto que, al final de la segunda fase sugiere fabricar únicamente un solo lote.

CUADRO (L.12). Lotes de producción que se deben realizar en cada período sugeridos por la solución obtenida mediante CPLEX con tiempo límite de 20 minutos y por la heurística de dos fases las instancias centro con 8 centros de distribución mas de 80 escenarios.

Per.	90 Esc.			100 Esc.			110 Esc.			120 Esc.			130 Esc.			140 Esc.			150 Esc.			160 Esc.		
	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2
1	2			8			2			3			5			4			8			3		
2		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
3	1	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
4	1						2			7						4								
5	1	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
6							2			1			6			1						2		
7		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
8		1	1								1	1		1	1		3	1		2	1		1	1
9	8			5	1	1		1	1		1		1									1		
10		1	1	1	1	1		3	1	1		1	1		1	1		2	1	1		1	1	1
11	1			1											1	1					1	1	1	1
12		1	1		1	1		2			1	1		2			1	1				1	1	1
13									1	1												1	1	1
14	1	1	1				1														1	1		
15					1	1		1	1		3			1	1		1	1		1	1		1	1
16	1	1	1		1	1					1	1		1		1			3					
17							2	1	1				1											
18		1	1		1	1					1	1		1	1		1	1		3	1		1	1
19							2	1	1		1	1		1	1		2	1		1	1		1	1
20		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
21		1	1	4	1	1		2	1	1			3						1	1		4		1
22		1	1		1	1		1	1		1	2		2	2		1	1		2	2		2	2
23	5	1	2	1	1	1		1	1		2	1		1	1		1	1		2	1		1	1
24	1	2	1		2	2		2	2		1	2		1	2		7	2		1	1		1	1
25	3	1	2	4	1	1		1	1	2		7		2	1		2	1		2	1		2	2
26	1	2	1		2	2	5	2	1		2	1		2	2		1	2		2	2		1	1
27		1	2		1	1		1	1		2	2		2	1		2	1		1	1		2	2
28		2	1	4	2	2		2	2		2	1		2	2		2	2		2	2		3	1
29	4	1	1		2	1		1	1	1		2	1		2	1		1	1		2	1		1
30		1	2	1	2	2	3	2	2		2	1		2	1		5	1		2	1		2	1
31		2	1		1	1	3	1	1		1	1		2	1		2	1		6	2		2	2
32	4	1	1		1	1		1	1		2	2		1	2		1	1		1	1		1	1
33	1	1	2		1	2		1	2		2	1		1	1		1	1		3	1		1	1
34	1	1	1		1	1	1	2	1		1	1		2	1		2	1		1	1		1	1
35		1	1		2	1		1	1		1	1		2	2		1	1		2	1		1	1
36		1	1	7	1	1		4	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1
37		1	1		1	1	4	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
38		1	1		1	1		1	1		1	1		2	1		1	1		1	1		1	1
39		1	1		1	1		1	1		1	1		6			1	1		1	1		1	1
40		1	1								1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
41	1	1		2	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		2	1		1	1
42	1	2	3		3	3		3	3		2	3		2	3		3	3		3	3		1	1
43		2			1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		2	2
44	2		1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
45		1																						
46											1													
47																								
48																						1		

CUADRO (L.15). Lotes de producción que se deben realizar en cada período sugeridos por la solución obtenida mediante CPLEX con tiempo límite de 20 minutos y por la heurística de dos fases las instancias completa con 8 centros de distribución hasta 80 escenarios.

Per.	10 Esc.			20 Esc.			30 Esc.			40 Esc.			50 Esc.			60 Esc.			70 Esc.			80 Esc.		
	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2	CP	F1	F2
1	2			2			1			8			3			5			2			6		
2		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
3	5	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1		1	1
4							1									5								
5		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
6				1												1			1					
7		1	1	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
8											1	1		1	1		1	1	2			1	1	1
9		1	1		1	1		1	1	1			2						1	1				
10				1							1	1	1	1	1		1	1					1	1
11		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1					1	1
12				1			1				1	1	1	1	1		1	1					1	1
13	7				1	1		1	1									7	1	1		1	1	1
14	1	1	1							2	1	1				1	1		1	1		1	1	1
15																		1	1			1	1	1
16		1	1		1	1	1	1	1		1	1						1	1		1	1	1	1
17										1	1				1	1	1		1	1		1	1	1
18	1				1	1	1	1	1	2												1	1	1
19	1	1	1							3	1	1		2	2		2	2		1	1	1	1	1
20		1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
21	3	2	2	4	2	2	1	2	2		1	1	1	1	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1
22		1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2		1	2	8	1	1	1	2	1	1	1	1
23	2	1	1	2	1	2	1	1	1		1	1	6	1	1		1	2	2	1	2	2	1	1
24		2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1		2	2		2	2		2	2	2	2	2
25		2	2		2	2		2	2		2	2	2	2	1		2	2		2	2	2	2	2
26	5	1	2	4	1	2	3	2	2	4	2	2		2	2	2	2	2		2	2	1	2	2
27		2	1	2	2	1		1	1	1	1	1		1	2		1	1	6	2	2	1	1	1
28	3	2	2		2	2		2	2	2	2	2		7	2	3	2	2		1	2	5	2	2
29		1	2		1	2	5	1	2		2	2		1	2		2	2		2	2		2	2
30		2	1		2	2	2	2	1		1	1	1	1	2	3	1	2	6	1	1	2	1	1
31		1	2		2	1	4	2	2		1	2	2		2	1	2	1		2	2		2	2
32	1	2	1	4	1	2	3	1	2	2	2	2	4	1	2		1	2		1	1		1	1
33	2	1	2		1	1	1	1	1	5	1	1	1	2	1		2	1		2	2	7	2	2
34	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2		1	1		1	1		1	1
35		1	2		2	1	2	1	2		2	2		2	1		1	2	6	2	1		2	2
36	1	2	1	1	2	1		1	1		1	1	2	1	1		1	1		1	1	2	1	1
37		1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1		2	2		1	1		1	1
38	2	2	1	7	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1		1	1
39	5	1	1	1	1	1		1	1	2	1	1	2	1	2		3	1		1	1		1	1
40		1	2		1	2		1	2		2	2		1	1		1	1		1	1		1	1
41		1			1	1	3	1	1	1		1		1	1		1	1		1	1		1	1
42		3	4		3	3		3	4		3	3		3	3		1	3		2	3		3	3
43	1	2	1		2	1		2	1		2	2		2	2		2	2		3	2		2	2
44			1			1		1	1	1	1	1			1		1	1			1		1	1
45		1			1												1							
46													1									1		
47																								
48																						1		

Planes de producción de mínima distancia

Se ve en este Anexo el resultado de la ejecución del modelo (76) para las instancias con diferentes zonas de demanda a satisfacer (Buenos Aires, centro, partida y completa) para las tres alternativas de centros de distribución utilizadas (6, 8 y 10). El plan de producción de mínima distancia tiene, en prácticamente, todos los períodos el mismo resultado que la solución hallada con la mayor cantidad de escenarios.

Apéndice N

**Parámetros heurística de ajuste por redondeo
mínimos y máximos**

En este cuadro se pueden ver los valores de ϵ y δ para los cuales se logró el mínimo y máximo tiempo de ejecución.

326N. PARÁMETROS HEURÍSTICA DE AJUSTE POR REDONDEO MÍNIMOS Y MÁXIMOS

CD	Escen.	Completa				Buenos Aires				Centro				Partida			
		Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo	
		ϵ	δ	ϵ	δ	ϵ	δ	ϵ	δ	ϵ	δ	ϵ	δ	ϵ	δ	ϵ	δ
06	10	0.50	0.09	0.05	0.03	0.40	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	20	0.50	0.18	0.05	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	30	0.50	0.06	0.05	0.03	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.30	0.06
06	40	0.50	0.09	0.05	0.03	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	50	0.50	0.03	0.05	0.03	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	60	0.50	0.21	0.05	0.03	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	70	0.50	0.03	0.05	0.03	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	80	0.50	0.21	0.05	0.03	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	90	0.50	0.21	0.10	0.03	0.50	0.12	0.20	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.20	0.06
06	100	0.50	0.09	0.10	0.03	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.12	0.20	0.06	0.50	0.06	0.20	0.06
06	110	0.50	0.15	0.05	0.03	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	120	0.45	0.09	0.05	0.03	0.40	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	130	0.40	0.21	0.05	0.03	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
06	140	0.50	0.15	0.10	0.03	0.40	0.12	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	10	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	20	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	30	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	40	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	50	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	60	0.50	0.12	0.10	0.06	0.40	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	70	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.20	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	80	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	90	0.40	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	100	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	110	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	120	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	130	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
08	140	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	10	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.20	0.06
10	20	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	30	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.40	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	40	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	50	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	60	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	70	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	80	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.40	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	90	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	100	0.50	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	110	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	120	0.50	0.12	0.10	0.06	0.40	0.12	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	130	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.18	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06
10	140	0.50	0.06	0.10	0.06	0.40	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06	0.50	0.06	0.10	0.06

Bibliografía

- [1] ABADIE A. AND IMBENS G. W. *A Martingale Representation for Matching Estimators* Journal of the American Statistical Association, (2012) Volumen 107, número 498, páginas 833 - 843.
- [2] AHMADIZAR F. AND ZEYNAVAND M. *Application of fuzzy mathematical programming to optimize an integrated production-distribution system* 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, (2011) páginas 1195 - 1198.
- [3] AKKERMAN R. - WANG Y. AND GRUNOW M. *MILP approaches to sustainable production and distribution of meal elements* 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering, (2009) páginas 973 - 978.
- [4] ALBORNOZ, VICTOR - GONZALEZ-ARAYA, MARCELA - GRIPE, MATÍAS AND RODRIGUEZ, SARA *A Mixed Integer Linear Programming model for planning at operative level in meat packing plant* 3rd International Workshop on Food Supply Chain, (2014).
- [5] ASPLEN M. *Dispersal strategies in terrestrial insects* Current Opinion in Insect Science, (2018) número 27, páginas 16 - 20.
- [6] MINISTERIO DE AGRO INDUSTRIA. PRESIDENCIA DE LA NACIÓN ARGENTINA *Estimaciones Agrícolas por Región* <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>, (2015).
- [7] BARD, JONATHAN F. AND NANANUKUL, NARAMETH *The integrated production-inventory-distribution-routing problem* Journal of Scheduling. Volumen 12 (2009), páginas 257 - 280.
- [8] BARRYMAN, ALAN A.: *The Origins and Evolution of Predator - Prey theory* Ecology. Volumen 73 (1992), número 5, páginas 1530 - 1535, Ecological Society of America.
- [9] BEDMAR, FRANCISCO *¿Qué son los plaguicidas?*. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Ciencia Hoy. Volumen 21 (2011) número 122, páginas 10 - 16.
- [10] BEN-TAL, A. AND NEMIROVSKI, A. *Robust solutions of uncertain linear programs* Operations Research Letters. Volumen 25 (1996), páginas 1 - 13.
- [11] BERTSIMAS, DIMITRIS AND SIM, MELVYN *Robust discrete optimization and network flows* Mathematical Programming Ser B. Volumen 98 (2003), páginas 49 - 71.
- [12] BERTSIMAS, DIMITRIS AND THIELE, AURÉLIE *A Robust Optimization Approach to Inventory Theory* Operations Research. Volumen 54 (2006), número 1, páginas 150 - 168.

- [13] BEYER, HANS-GEORG AND SENDHOFF, BERNHARD *Robust Optimization - A comprehensive survey* Computer Methods in applied mechanics and engineering. Volumen 196 (2007), páginas 3190 - 3218.
- [14] BIRGE, JOHN R. AND LOUVEAUX, FRANCOIS *Introduction to Stochastic Programming - Second Edition* Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, (2011).
- [15] BLUM C. - PUCHINGER J. - RAIDL G. AND ROLI A. *Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey* Applied Soft Computing. Volumen 2011, número 11, páginas 4135 - 4151.
- [16] BANCO MUNDIAL <http://datos.bancomundial.org> Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=AR>
- [17] BOUDIA M. - DAUZERE-PERES S. - PRINS C. AND LOULY M. A. O. *Integrated optimization of production and distribution for several products* Proceedings - ICSSSM'06: 2006 International Conference on Service Systems and Service Management Volumen 1 (2006), páginas 272 - 277.
- [18] CASAFE *Mercado Argentino de Productos Fitosanitarios / Año 2011 vs Año 2012* Informe Especial elaborado por Klefmann & Partner SRL. (2015) obtenido en <https://www.casafe.org/pdf/2015/ESTADISTICAS/Informe-Mercado-Fitosanitario-2012.pdf>
- [19] CASEY, MICHAEL S. AND SEN, SUVRAJEET *The Scenario Generation Algorithm for Multistage Stochastic Linear Programming* Mathematics of Operations Research. Volumen 30 (2005), número 3, páginas 615 - 631.
- [20] CHAPMAN R. F. *The Insects. Structure and Functions* Cambridge University Press (1998) 4th edition, páginas 403 - 407.
- [21] CHEN Z. AND LI L. *Coordination mechanism and algorithm for decentralized production-distribution planning* 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC) Páginas 1038 - 1041 (2011).
- [22] CHVATAL, VASEK *Linear Programming* Mc Hill W H Freeman and Company, (1983)
- [23] COCKS, K. D. *Discrete stochastic programming* Management science. Volumen 15 (1968), número 1, Theory Series, páginas 72 - 79.
- [24] DANNENBRING, DAVID G. *An Evaluation of Flow Shop Sequencing Heuristics* Management Science. Volumen 23 (1977), número 11, páginas 1174 - 1182.
- [25] DANTZIG, GEORGE B. *Linear programming under uncertainty* The Rand Corporation, (1955).
- [26] DANTZIG, GEORGE B. *Linear programming and Extensions* The Rand Corporation, (1963).
- [27] DHAENENS-FLIPO, CLARISSE AND FINKE, GERD *An integrated model for an industrial production - distribution problem* IIE Transactions. Volumen 33 (2001), páginas 705 - 715.
- [28] DUPACOVA, JITK - CONSIGLI, GIORGIO AND WALLACE, STEIN W. *Scenarios for Multistage Stochastic Programs* Annals of Operations Research. Volumen 100 (2000), páginas 25 - 53.
- [29] ESCUDERO L. A. - ROSELLÓ J. - ALEIXANDRE E. Y FERRAGUT F. *Colonización y dispersión de los ácaros en un ecosistema hortícola protegido: características y factores responsables* Boletín de sanidad vegetal. Plagas. Volumen 25 (1999), número 2, páginas 143 - 155.

- [30] FENG, PINGPING - LIUA, YA - WU, FENG AND CHU, CHENGBIN *Two heuristics for coordinating production planning and transportation planning* International Journal of Production Research. Volumen 56 (2018), número 21, páginas 6872 - 6889.
- [31] FOULDS, L. R. *The Heuristic Problem-Solving Approach* The Journal of the Operational Research Society. Volumen 34 (1983), número 10, páginas 927 - 934.
- [32] GARCIA, DANIEL J. AND YOU, FENGQI *Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities* Computers and Chemical Engineering. Volumen 81 (2015), páginas 153 - 170.
- [33] GIRALDO G. AND ALVARADO M. *Distribución geográfica de Eubeonymus mariaefranciscæ Roud. (Coleóptera: Curculionidae) plaga de al remolacha* Boletín de sanidad vegetal. Plagas. Volumen 16 (1990), páginas 399 - 404.
- [34] GLASSERMAN, PAUL *Monte Carlo Methods in Financial Engineering* Springer Science + Business Media, New York, (2003).
- [35] GUILLAUME R. - KOBYLAŃSKI P. AND ZIELIŃSKI P. *Production planning with uncertain demands* 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011) (2011), páginas 2644 - 2649.
- [36] GUNTHER H. O. AND KANNEGIESSER M. *An MILP model application for supply network planning in the production of chemical commodities* 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (2007), páginas 1357 - 1361.
- [37] HANG-MIN C. AND IN-JAE J. *A Multi-objective Constraint Programming for Centralized Production-distribution Planning* ICROS-SICE International Joint Conference (2009), páginas 5639 - 5644.
- [38] HILLIER, FREDERICK S. Y LIEBERMAN, GERALD J. *Investigación de Operaciones 10ma Edición* Mc Grau Hill, (2015).
- [39] HOLLOWAY P. - MILLER J. A. AND GILLINGS S. *Incorporating movement in species distribution models: how do simulations of dispersal affect the accuracy and uncertainty of projections?* International Journal of Geographical Information Science. Volumen 30 (2016), número 10, páginas 2050 - 2074.
- [40] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSO *Exportación por Grandes Rubros. Años 1980-2018*. https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/economia/exp_gr_80_18.xls (2014)
- [41] JANAK, STACY L - LIN, XIAOXIA AND FLOUDAS, CHRISTODOULOS *A new robust optimization approach for scheduling. Uncertainty with known probability distribution* Computers & Chemical Engineering. Volumen 31 (2007), páginas 171 - 195.
- [42] LAN, FUJUN - LIN, WEI HUA AND LANSEY, KEVIN *Scenario-based robust optimization of a water supply system under risk of facility failure* Environmental Modelling & Software. Volumen 67 (2015), páginas 160 - 172.
- [43] KAUT, MICHAL AND WALLACE, STEIN W. *Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming* Pacific Journal of Optimization. Volumen 3 (2003), páginas 1 - 16.

- [44] LEUNG, STEPHEN C.H. - TSANG, SALLY O.S. - NG, W.L. AND WU, YUE *A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment* European Journal of Operational Research. Volumen 181 (2007), páginas 224 - 238.
- [45] LIAO, L - SARIN, SC AND SHERALI, HD *A scenario generation-based lower bounding approach for stochastic scheduling problems* Journal of Operational Research Society. Volumen 63 (2012), número 10, páginas 1410 - 1420.
- [46] LURIE, PHILIP M. AND GOLDBERG, MATTHEW S. *An Approximate Method for Sampling Correlated Random Variables from Partially-Specified Distributions* Management science. Volumen 44 (1998), número 2, páginas 203 - 218.
- [47] MAATMAN, A. - SCHWEIGMAN, C. - RUIJS, A. AND VAN DER VLERK, M. H. *Modeling Farmers' Response to Uncertain Rainfall in Burkina Faso: A Stochastic Programming Approach* Operations Research. Volumen 50 (2002), número 3, páginas 399 - 414.
- [48] MAMMOLA, S. - PETILLON, J. - HACALA, A. - MONSIMET, J. - MARTI, S. L. - CARDOSO, P. AND LAFAGE D. *Challenges and opportunities of species distribution modelling of terrestrial arthropod predators* Diversity and Distributions. Volumen 27 (2021), páginas 2596 - 2614.
- [49] MATEO, R. G. - FELICÍSIMO, A. M. Y MUÑOZ J. *Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética* Revista Chilena de Historia Natural. Volumen 84 (2011), páginas 217 - 240
- [50] SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA, MINISTERIO DE ECONOMÍA *Tablero de cultivos Estimaciones Agrícolas Área sembrada de Soja Campaña 2013 / 14* obtenido en <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/tableros/tablero-cultivos.php?accion=imp> (2016)
- [51] MBONG, A. G. - TEMBE-FOKUNANG, E. A. - BERINYUY, E. B. - MANJU, E. B. - NGO, V. N. - MBAH, J. A. - GALEGA TANGHAM, B. P. AND FOKUNANG C. N. *An Overview of the Impact of Climate Change on Pathogens, Pest of Crops on Sustainable Food Biosecurity* International Journal of Ecotoxicology and Ecobiology. Volumen 4 (2019), páginas 114 - 124
- [52] MOSTAFA, N. A. AND ELTAWIL, A. B. *The Production-Inventory-Distribution-Routing Problem* Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (2015), páginas 2452 - 2461.
- [53] NOURIFAR, RAHELEH - MAHDAVI, IRAJ - MAHDAVI-AMIRI, NEZAM AND PAYDAR, MOHAMMAD MAHDI *Optimizing decentralized production-distribution planning problem in a multi-period supply chain network under uncertainty* Journal of Industrial Engineering International. Volumen 14 (2018), páginas 367 - 382.
- [54] OTERO, M. OTERO AND SOLARI, H. G. *Stochastic eco-epidemiological model of dengue disease transmission by Aedes aegypti mosquito* Mathematical Biosciences. Volumen 223 (2009), número 1, páginas 32 - 46.
- [55] PAP, Z. *Crop rotation constraints in agricultural production planning* 2008 6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics. (2008), páginas 1 - 5
- [56] PARK, BYUNG JOO - CHOI, HYUNG RIM AND KANG, MOO HONG *Integration of Production and Distribution Planning Using a Genetic Algorithm in Supply Chain Management* Analysis and

- Design of Intelligent Systems using Soft Computing Techniques. Volumen 41 (2007), páginas 416 - 426.
- [57] PEETERS, YANNIK AND DER BOER, ARNOUD V. *Stochastic approximation for uncapacitated assortment optimization under the multinomial logit model* Naval Research Logistics. Volumen 69 (2022), páginas 927 - 938.
- [58] PINHEIRO DE LIMA, ORLEM - BREVAL SANTIAGO, SANDRO - RODRIGUEZ TABOADA, CARLOS MANUEL Y FOLLMAN, NEIMAR *Una nueva definición de la logística interna y forma de evaluar la misma* Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería. Volumen 25 (2015), número 2, páginas 264 - 276.
- [59] QUAN, L. AND HUI, M. *A Collaborative Production Planning Model for Multi-Agent Based Supply Chain* Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. (2008), páginas 512 - 515.
- [60] RODRIGUEZ-REY, M - JIMENEZ-VALVERDE, A AND ACEBEDO P. *Species distribution models predict range expansion better than chance but not better than a simple dispersal model* Ecological Modelling. Número 256 (2013), páginas 1 - 5.
- [61] SAFAEAIA, A.S. - MOATTAR HUSSEINI, S.M. - FARAHANI, R. Z. - JOLAI, F. AND GHODSYPUR, S.H. *Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modelling* International Journal of Production Research. Volumen 48 (2010), número 14, páginas 4043 - 4069.
- [62] SAPPINGTON, T. W. *Migratory flight of insect pests within a year-round distribution: European corn borer as a case study* Journal of Integrative Agriculture. Volumen 17 (2018), número 7, páginas 1485 - 1505.
- [63] SHAPIRO, ALEXANDER - DENTCHEVA, DARINKA AND RUSZCZYNSKI, ANDRZEJ *Lectures on Stochastic Programming - Modeling and Theory* MPS-SIAM series on optimization, (2009).
- [64] SHIGUEMOTO, A. L. AND ARMENTANO, V. A. *A tabu search procedure for coordinating production, inventory and distribution routing problems* International Transactions in Operational Research. Volumen 17 (2010), páginas 179 - 195.
- [65] SMITH, JAMES E. *Moment Methods for Decision Analysis* Management Science. Volumen 39 (1993), número 3, páginas 340 - 358.
- [66] EL-GHAZALI, TALBI: *Metaheuristics from Design to Implementation* A John Wiley & sons. Inc. Publication, (2009).
- [67] TORABI, S. A. - POURGHADERI, A. R. AND SEKHAVAT S. *A two step approach including scatter search algorithm for the integrated procurement, production and distribution planning* 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (2009) páginas 354 - 359.
- [68] VACLAVIK, T AND MEENTEMEYER, R.K. *Invasive species distribution modeling (iSDM): Are absence data and dispersal constraints needed to predict actual distributions* Ecological Modelling. Volumen 220 (2009), páginas 3248 - 3258.

- [69] VAN DER GAAG, D.J. - HOLT, J. - LEACH, A. W. AND LOOMANS, A. J. M. *Model of the probability of pest transfer to a site suitable for establishment following their arrival on imported fruit, cut-flower or vegetable produce* Crop Protection. Volumen 117 (2019), páginas 135 - 146.
- [70] VÉRON, JACQUES: *Alfred J. Lotka and the Mathematics of Population* Electronic Journal for History of Probability and Statistics. Volumen 4 (2008), número 1.
- [71] VILLACIDE, J. M. - MASCIOCCHI, M. Y CORLEY J. C. *Avispas exóticas en la Patagonia: la importancia de la ecología de invasiones en el manejo de plagas* Ecología Austral. Volumen 24 (2014), número 2, páginas 154 - 161.
- [72] WOODRUFF, JOSHUA AND DIMITROV, NEDIALKO B. *Optimal discretization for decision analysis* Operations Research Perspectives. Volumen 5 (2018), páginas 288 - 305.
- [73] YANTAO, L. - LONG, Z. - ZHINDONG, T AND TINGTING, Z. *Coexistence for an Almost Periodic Predator-Prey Model with Intermittent Predation Driven by Discontinuous Prey Dispersal* Discrete Dynamics in Nature and Society. Volumen 2017, páginas 1 - 15.
- [74] YAKUBU, A. *Asynchronous and Synchronous Dispersals in Spatially Discrete Population Models* SIAM J. Applied dynamical systems, Volumen 7 (2008), número 2, páginas 284 - 310.
- [75] CHIAN-SON, YU AND HAN-LIN, LI *A robust optimization model for stochastic logistic problems* International Journal of Production economics. Volumen 64 (2000), páginas 385 - 397.
- [76] ZHAO, S.T. - YUAN, X.M. AND LING S.F. *Production and Distribution Planning Model for Hinterland Supply Chain* 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (2011), páginas 247 - 251