

Tipo de documento: Tesis de maestría

Escuela de Negocios. Master in Management + Analytics

Optimizando el uso de los recursos hospitalarios: planificación quirúrgica y gestión de camas utilizando Programación Lineal Entera Mixta

Autoría: Rogatky, Tatiana

Año: 2023

¿Cómo citar este trabajo?

Rogatky, T. (2024) "Optimizando el uso de los recursos hospitalarios: planificación quirúrgica y gestión de camas utilizando Programación Lineal Entera Mixta". [*Tesis de maestría. Universidad Torcuato Di Tella*]. Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella
<https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/12665>

El presente documento se encuentra alojado en el Repositorio Digital de la Universidad Torcuato Di Tella bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Argentina (CC BY-NC-SA 4.0 AR)
Dirección: <https://repositorio.utdt.edu>



**UNIVERSIDAD
TORCUATO DI TELLA**

MASTER IN MANAGEMENT + ANALYTICS

**OPTIMIZANDO EL USO DE LOS RECURSOS
HOSPITALARIOS: PLANIFICACIÓN QUIRÚRGICA Y
GESTIÓN DE CAMAS UTILIZANDO PROGRAMACIÓN
LINEAL ENTERA MIXTA**

TESIS

Tatiana Rogatky

Diciembre 2023

Director: Juan José Miranda Bront

Resumen

En los centros de salud del país el proceso de asignación de recursos estratégicos como los quirófanos o las camas de internación sigue habitualmente un procedimiento manual. Este método posee limitaciones que podrían afectar significativamente la eficiencia general de las instituciones. Uno de los principales aspectos es el impacto directo que la programación quirúrgica tiene en la demanda de camas hospitalarias. Esta variable es muy relevante dado que la correcta gestión de camas es esencial para garantizar un flujo operativo eficiente en la institución y para brindar servicios de salud de adecuada calidad a los pacientes. La complejidad inherente de la planificación quirúrgica y la necesidad de una asignación eficiente de recursos demandan enfoques más avanzados y precisos.

Nuestro trabajo se centra en el armado de una programación quirúrgica utilizando técnicas de programación lineal entera mixta (MIP). El modelo que proponemos tiene en consideración las políticas de atención e intereses estratégicos de la institución, y busca optimizar los recursos de manera integral. Para ello abarcamos no solo la utilización óptima de los quirófanos sino también las camas de internación, incorporando una variable importante de utilización de recursos que es la estancia hospitalaria promedio (ALOS, *Average Length Of Stay*).

Utilizando datos reales, nuestro trabajo plantea dos experimentos computacionales. En el primero, empleamos valores promedio semanales en términos de la cantidad de cirugías, la duración del bloque y la estancia hospitalaria para definir cada bloque quirúrgico. Además, estimamos la capacidad de camas promedio para cada día de la semana. A través de este modelo, creamos una programación cíclica semanal que busca maximizar la asignación de bloques quirúrgicos, al tiempo que minimiza los cambios de día de la asignación de bloques correspondientes a cirujanos que rutinariamente llevan a cabo procedimientos en la institución. Todo esto, sujeto a la condición de no exceder la capacidad máxima de camas establecida por día de la semana para pacientes quirúrgicos. En el segundo experimento, de factibilidad, en base a datos operativos reales creamos cuatro instancias semanales consecutivas y, en lugar de valores promedio, utilizamos valores reales para definir cada bloque quirúrgico. Adicionalmente este experimento incorpora la información del día de asignación de los bloques quirúrgicos generada por el primer modelo.

Al comparar nuestra solución con la programación manual, se observa que el censo de internación general aumenta un 3,04% los fines de semana por aporte de pacientes quirúrgicos, mientras que se observa una reducción de la utilización de camas los días intermedios de la semana, lo que permite disminuir la cantidad de rechazos de pacientes clínicos en un 38.46%. Ambas variaciones impactan positivamente en la cantidad de servicios brindados y facturación de la institución.

Abstract

In Argentinean healthcare centers, the allocation process of strategic resources such as operating rooms or hospital beds typically follows a manual procedure. This method has limitations that could significantly impact the overall efficiency of institutions. One of the main aspects is the direct impact that surgical scheduling has on the demand for hospital beds. This variable is highly relevant, as proper bed management is essential to ensure an efficient operational flow in the institution and also to provide high-quality health services to patients. The inherent complexity of surgical planning and the need for efficient resource allocation require more advanced and precise approaches.

Our work focuses on building surgical scheduling routines using Mixed integer linear programming (MIP) techniques. The model we propose takes into account the care policies and strategic interests of the institution, aiming to optimize resources comprehensively. We address not only the optimal use of operating rooms but also the hospital beds, incorporating an important resource utilization variable, the Average Length of Stay (ALOS).

Using real data, our work presents two computational experiments. In the first one, we use weekly average values for the number of surgeries, block duration, and hospital stay to define each surgical block. Additionally, we estimate the average bed capacity for each day of the week. Through this model, we create a weekly cyclic schedule that seeks to maximize the allocation of surgical blocks while minimizing changes in the assignment days for surgeons who routinely perform procedures in the institution. All of this is subject to the condition of not exceeding the maximum bed capacity for surgical patients defined for each day of the week. In the second feasibility experiment, we create four consecutive weekly instances, using real values instead of averages to define each surgical block. This experiment also incorporates the information about the assignment days of surgical blocks generated by the first model.

Comparing our solution with manual scheduling, we observed that the overall hospitalization census increases by 3.04% on weekends due to the contribution of surgical patients, while there is a reduction in bed utilization on weekdays, allowing a 38.46% decrease in rejection of clinical patients. Both variations have a positive impact on the quantity of services provided and the institution's revenue.

Índice

1. Introducción	6
1.1 Sistema sanitario y prestadores privados de salud	7
1.2 Gestión hospitalaria	8
1.3 El quirófano y la agenda quirúrgica	10
1.4 Utilización de herramientas de optimización en salud.	11
2. Buscando la optimización integral de los recursos hospitalarios	15
2.1 Exploración de datos	16
3. Resolviendo el desafío operativo	26
3.2 Preguntas a resolver	26
3.3 Propuesta de modelo	26
4. Modelo matemático	32
5. Experimentos computacionales	35
5.1 Experimento basado en valores promedios	35
5.2 Modelo de factibilidad	40
5.3 Caso de negocio	45
6. Conclusiones y trabajo futuro	51
Referencias bibliográficas	54

1. Introducción

La organización de los servicios de salud en Argentina y el mundo está en crisis desde hace años. El desacople de los costos respecto a los recursos económicos disponibles es un aspecto central de esta crisis que se ha visto re-agudizada por la reciente pandemia. Existe consenso en que son necesarios nuevos abordajes para lograr los resultados deseados. OCDE, 2020 [1]. Hay consenso también en que los sistemas actuales son ineficientes y consumen un porcentaje importante de los recursos en actividades que no contribuyen a solucionar los problemas de salud de las personas y poblaciones, catalogadas como desperdicio. OMS, 2000 [2].

Largos tiempos de espera, cancelaciones, falta de recursos, excesos de inventarios son algunos de los síntomas que frecuentemente pueden observarse en las instituciones de salud. Muchas veces se cree que al ser una industria particular en donde el consumo de los clientes (pacientes) es imprevisto debido a sus condiciones clínicas, no se puede prever la demanda y los recursos necesarios. Esto provoca elevados niveles de desperdicios afectando la rentabilidad de las instituciones y la calidad del servicio brindado.

La manera tradicional de abordar estas problemáticas se basa en contratar más personal, invertir en equipamiento u otros recursos, pero esto se vuelve cada vez menos posible debido a los incrementos de los costos en salud. Además, estas iniciativas no resuelven las causas de base que se deben principalmente a ineficiencias en la planificación del personal, utilización y asignación de los recursos.

En los últimos años, la industria de la salud ha adoptado estrategias provenientes de otras industrias, destacando la metodología LEAN, D'Andreamatteo et al. 2015 [3], creada por Toyota para eliminar el desperdicio y maximizar la productividad. Sin embargo, a pesar de estas implementaciones, aún persisten desafíos en la mejora integral de las operaciones.

En este contexto pareciera haber una clara oportunidad para acelerar la transformación digital en general, y para comenzar a utilizar herramientas de *Analytics* que permitan explotar los datos generados y mejorar la gestión hospitalaria en particular.

1.1 Sistema sanitario y prestadores privados de salud

El Sistema de Salud argentino tiene una estructura compleja en la que coexisten tres subsistemas: el Público, el de la Seguridad Social y el Privado. Además existen, en una visión simplificada, tres componentes básicos: los financiadores que proveen los recursos económicos, los prestadores de los servicios sanitarios y los proveedores de tecnología (equipamiento y medicamentos). Si bien la mayoría de los fondos que financian el sistema son públicos (sean estos nacionales, provinciales o municipales), la estructura prestacional es mayoritariamente privada. Los prestadores privados se financian de manera directa a través del bolsillo de las personas, por contribuciones de la seguridad social, o mediante cargos por los servicios brindados a las empresas de medicina privada (financiadores privados o prepagas).

De la información brindada por el INDEC (Condiciones de Vida INDEC, 2021) [4] en cuanto a la cobertura médica en Argentina el 32,1% solo posee cobertura médica a través del sistema público y el 67,8% de las personas cuenta con obra social, prepaga, mutual y/o servicio de emergencia. Este dato, sumado al creciente aumento de los costos, entre los que cabe señalar medicamentos, tecnología médica, personal, etc., y su desfase con los aranceles ha hecho que todo el sistema de salud, pero sobre todo el sector prestacional privado, se viera muy afectado como detalla el informe N° 18 de ADECRA del 2021. [5].

No hay que perder de vista que el principal objetivo de los proveedores de salud es brindar la mejor asistencia sanitaria con la más alta calidad. Como mencionan en su trabajo Maceira y Espínola, 2017 [6]:

“Desde una mirada sistémica, los mecanismos de protección en el sector sanitario se encuentran ante un desafío creciente: cómo sostener/aumentar los niveles de cobertura y calidad sin arriesgar su sustentabilidad financiera, al tiempo que no se transfieran a los/ as usuarias/os mediante pagos de bolsillo (copagos, etcétera) los costos adicionales de esta dinámica.”

Debido a todo esto, es esencial que los prestadores de salud adopten medidas para garantizar su sustentabilidad a lo largo del tiempo. Una de las acciones más importantes que pueden llevar a cabo es reducir el desperdicio y, de esta manera, contener los costos mientras mantienen la calidad de los servicios brindados. La eficiente planificación y optimización del uso de los recursos serán fundamentales para lograr este objetivo.

1.2 Gestión hospitalaria

En el escenario actual en donde los costos de la atención médica se encuentran en continuo aumento, la utilización óptima de los recursos se ha vuelto una de las actividades principales de la gestión hospitalaria en el mundo, pero sobre todo en Argentina. Administrar estos recursos, especialmente las camas de internación por ser el recurso estrella del hospital, requiere de un análisis detallado de las capacidades y demandas, puesto que su asignación óptima hará sustentable a la organización. Una característica de los centros de internación de pacientes con patologías agudas, sean estos públicos o privados, es que son organizaciones mano de obra intensiva cuyo costo operativo es mayoritariamente fijo. Esto implica que el costo de mantener el hospital funcionando varía poco en función del nivel de ocupación del mismo.

El paciente que termina ocupando una cama de internación tiene dos vías de ingreso. Una de ellas es la demanda no programada, es decir pacientes que ingresan por guardia o emergencias. La otra es la actividad quirúrgica programada en donde el paciente, luego de una intervención en quirófano, requiere una cama de internación para su seguimiento hospitalario y recuperación. Si bien la demanda espontánea o no programada es aleatoria, generalmente su curva presenta estacionalidades. Por el contrario la demanda de camas desde quirófano está relacionada específicamente con el plan maestro de programación quirúrgica (con la excepción de las intervenciones quirúrgicas de urgencia que constituyen un porcentaje menor de la demanda). La Figura 1 ilustra el proceso de ingreso de pacientes y las transferencias entre áreas en una institución de salud.

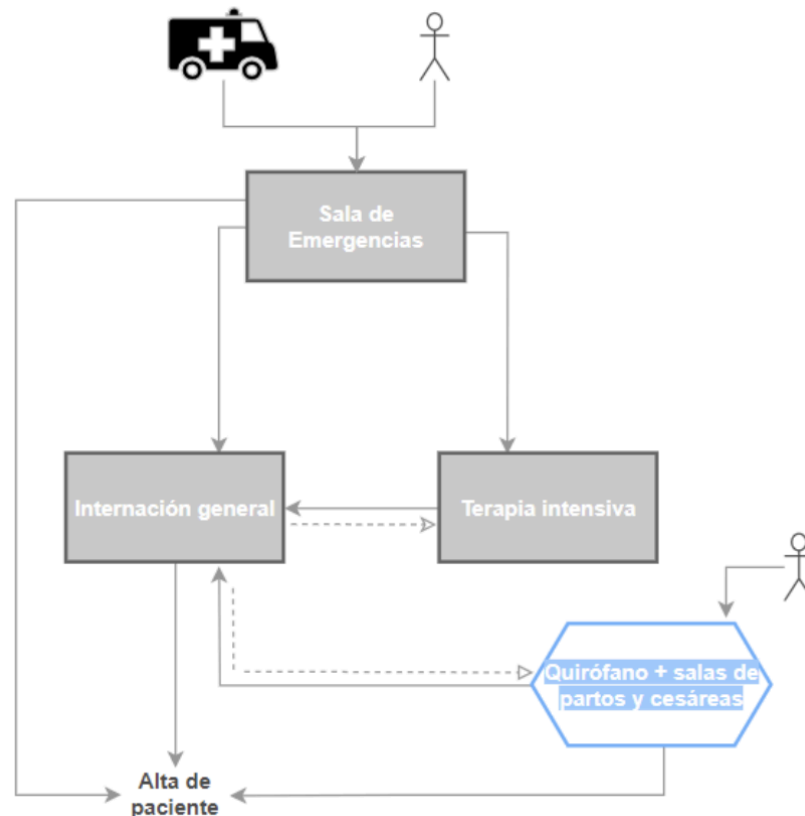


Figura 1. Proceso de Ingreso de Pacientes y Transferencias entre Áreas en una Institución de Salud.

Los pacientes que ingresan a los hospitales de forma programada y no programada compiten por el uso de las mismas camas de internación. Es por ello que una métrica central en la gestión del recurso camas es la estancia media hospitalaria (Average Length Of Stay, ALOS). Los tiempos de permanencia de los pacientes varían en función de distintos factores. Para las internaciones no programadas un factor determinante es la enfermedad actual que motiva la internación a los que se agregan la edad, el sexo y las comorbilidades, entre otros. En el caso de los pacientes quirúrgicos programados el factor más importante que determina el ALOS es el procedimiento quirúrgico al que se somete.

Un problema común en los hospitales es la variación extrema en la ocupación diaria de camas como explican Litvak y Long, 2000 [7]. Durante los períodos de alta ocupación, surgen problemas operativos que resultan en cuellos de botella en los servicios ofrecidos, lo cual afecta directamente el flujo de pacientes y disminuye la calidad de atención, generando insatisfacción. Esta situación tiene repercusiones a mediano y largo plazo, ya que puede dañar la reputación de las organizaciones y comprometer su sustentabilidad. En los días en que la ocupación es baja, los recursos no utilizados continúan generando costos fijos como mencionamos anteriormente. Adicionalmente los cuellos de botella pueden generar sobreocupación hospitalaria obligando a la suspensión de las actividades quirúrgicas por falta

de disponibilidad de camas y, en ese caso, a la baja calidad de servicio se le suma la pérdida económica de no aprovechar la capacidad de la planta quirúrgica instalada, que como el resto del hospital tiene costos operativos mayoritariamente fijos.

En este contexto, el quirófano adquiere una importancia significativa. Por un lado, la actividad quirúrgica puede ser reconocida como una fuente principal de ingresos del hospital y uno de los más grandes consumidores de recursos. Por otro lado, como mencionan Beliën y Demeulemeester, 2007 [8], lo que sucede dentro del quirófano tiene un impacto directo en diversas áreas, siendo la más destacada de ellas la demanda interna de camas. Como mencionamos anteriormente se espera que un paciente que se somete a una intervención quirúrgica se recupere luego de algunos días estimado por el ALOS de esa cirugía. En consecuencia, la relación entre estas dos áreas es muy importante y compleja. Si el objetivo de la gestión es maximizar el rendimiento de los recursos de todo el hospital es razonable pensar que un buen *scheduling* quirúrgico pueda contribuir a resolver el problema por el cual se generan los cuellos de botella: la gran variabilidad diaria en el censo de internación. Este término hace referencia al número de pacientes hospitalizados en un momento dado, lo cual puede fluctuar debido a ingresos, altas y traslados.

1.3 El quirófano y la agenda quirúrgica

El quirófano es un área dentro del hospital en el cual se opera, o interviene quirúrgicamente, a un paciente que así lo requiera. El funcionamiento del departamento quirúrgico requiere de un conjunto de procesos coordinados e interrelacionados. Precisa de salas quirúrgicas en donde llevar a cabo los procedimientos, equipamiento, medicación e insumos. Si bien el cirujano es quien realiza la operación, trabaja en equipo y de manera coordinada con el personal de enfermería, instrumentación, anestesiología, técnicos, farmacia, camilleros, limpieza, ropería y administrativos.

El proceso que da lugar a que un paciente se someta a una intervención quirúrgica se origina, salvo en los casos urgentes, en el consultorio. Allí el cirujano explica sobre los preparativos pre y post operatorios, y programa una fecha y hora para realizar dicho procedimiento. Cada una de estas cirugías llenan lo que se denomina la agenda quirúrgica (*schedule*) en donde se define para cada día y para cada sala quirúrgica quién opera, la especialidad, la duración de la cirugía, la cantidad de pacientes y los materiales requeridos. Este proceso pretende contemplar además de la capacidad de la planta quirúrgica, las preferencias de los cirujanos.

Dependiendo de las políticas del hospital o sanatorio, la agenda quirúrgica, la cual generalmente se diseña con un horizonte de tiempo semanal, puede tener tres tipos de esquemas. El primero consiste en dividir el tiempo quirúrgico en “Bloques”, que determinan franjas de tiempo definidos en días y horarios en que cada quirófano está disponible para un equipo quirúrgico de una especialidad determinada. En el segundo esquema no se usan Bloques y cada cirugía demandada se agenda en cualquier día y quirófano. Por último y más frecuente, se realiza un mix de ambos esquemas. Un bloque se define como una franja horaria en donde una especialidad o cirujano puede agendar sus cirugías. Una misma especialidad o cirujano puede tener una o varias franjas horarias en distintos días de la semana y distintos quirófanos. La agenda quirúrgica gestionada por bloques tiene sus pros y contras. Por un lado permite equilibrar de manera anticipada el tiempo de quirófano destinado a cada especialidad, pero en algunos casos, si no se realiza una revisión periódica del uso de los mismos, puede presentar el inconveniente de la subutilización, y con ello consecuencias negativas como el aumento de los costos operativos.

1.4 Utilización de herramientas de optimización en salud.

Si el objetivo es brindar la mejor calidad asistencial al menor costo, no es difícil imaginar que el uso de técnicas de optimización podría ser el camino para que los recursos físicos y humanos de un hospital se asignen de manera eficiente, se mejoren los procesos de atención médica y de planificación de servicios, y se asegure la satisfacción del paciente. En este sentido, la investigación operativa ha sido de gran ayuda para resolver variedad de problemas de la gestión hospitalaria. Entre ellos cabe destacar la programación de admisión de pacientes (PAS, por sus siglas en inglés), término que formuló por primera vez Demeester et al. en 2008 [9] y luego le siguieron investigaciones de Bilgin et al., 2008 [10]. Este es un problema de optimización combinatorio que busca por un lado maximizar la eficiencia del tratamiento médico, pero también la satisfacción y comodidad del paciente. Problemas de asignación de recursos es otra área de interés, un ejemplo de ellos es el problema de asignación de enfermeras (NSP, *Nurse Scheduling Problem*), el cual busca equilibrar la carga de trabajo en los diferentes turnos y unidades de cuidados, e intenta satisfacer las preferencias del personal. El objetivo del NSP es minimizar los costos de personal mientras se garantiza una adecuada calidad de atención para los pacientes. Se puede modelar de diversas maneras, pero la más usada en la bibliografía es mediante el uso de programación entera mixta (MILP) como es el caso del trabajo publicado por Glass y Knight en 2010. [11]

En lo que respecta a quirófanos y la utilización eficiente de los mismos el mayor aporte viene de la mano del armado de la programación quirúrgica. En relación a esto algunos autores han presentado modelos que buscan maximizar la utilización de las salas quirúrgicas. Dexter et al. en 1999 [12] proponen un algoritmo que permite seleccionar ciertas cirugías de una lista de cirugías adicionales o no programadas con antelación, que puedan agregarse a tiempos libres de quirófanos con el objetivo de aumentar la productividad. Utilizan simulación por computadora para evaluar diez algoritmos de programación, y se identificó el algoritmo *Best Fit Descending with fuzzy constraints* como el que mejores resultados en términos del objetivo aporta. Sin embargo, se destaca la necesidad de estudiar la facilidad de implementación del algoritmo, así como las condiciones bajo las cuales realmente aumenta o no la utilización del quirófano en comparación con las estrategias utilizadas actualmente por los administradores de quirófano. Guinet y Chaabane en 2003 [13], proponen un modelo de asignación de cirugías a salas quirúrgicas con restricciones de capacidad y tiempo, en el cual por naturaleza de la gestión del hospital el paciente se interna varios días previos a la cirugía, de esta manera se plantea como función objetivo minimizar el tiempo de espera, es decir el tiempo transcurrido desde que el paciente es hospitalizado hasta que se produce la intervención quirúrgica, el cual está asociado a un costo de internación. Este modelo de asignación general se resuelve mediante una heurística primal-dual obteniendo mejoras en la calidad y eficiencia de los servicios brindados. Los autores plantean como oportunidad de mejora sumarle a esta herramienta de toma de decisiones la disponibilidad de camas. Por su parte, Jebali et al. en 2006 [14] presentan un modelo para un scheduling diario. Al final de cada día proponen determinar la programación de la sala de operaciones para el próximo día de operaciones, en donde se busca minimizar el costo incurrido en la espera de un paciente, el uso de horas extras y de horas incompletas de la sala quirúrgica, sujeto a capacidad horaria y la disponibilidad de camas en terapia intensiva. Para el modelado, en lugar de enfoques heurísticos, se propone una formulación directa como un modelo (MIP), que consiste de dos etapas: en la primera se asignan cirugías a salas quirúrgicas y en la segunda se optimiza la secuencia de cirugías definidas en el primer paso para satisfacer las restricciones. Es importante destacar que este plan de programación, que implica la asignación de cirugías para el día siguiente, resulta factible únicamente en circunstancias especiales. Tales casos, incluyen la participación de cirujanos que son miembros internos de la institución y que exclusivamente realizan procedimientos quirúrgicos en esa institución. Además, los pacientes ya han estado hospitalizados durante varios días antes de la cirugía, lo que simplifica la coordinación entre el cirujano y el paciente con un día de anticipación, sin que esto genere dificultades.

Ogulata y Erol, 2003 [15] proponen un enfoque de programación multiobjetivo jerárquico para obtener soluciones óptimas. El modelo propuesto tiene por objetivo maximizar la utilización global de todos los quirófanos, equilibrando la distribución de horas y días de operación entre los distintos grupos quirúrgicos o especialidades, y minimizar los tiempos de espera de los pacientes. Las tres etapas jerárquicas son las siguientes: la primera es la planificación de admisión, su objetivo es determinar la lista de pacientes cuyas operaciones serían programadas para la semana siguiente en función de su fecha de llegada y de la criticidad del paciente. La segunda etapa consiste en asignar estas cirugías a un grupo quirúrgico, y por último asignar los grupos quirúrgicos a los distintos quirófanos. Por su parte, Testi et al. en 2007 [16] presentan algo similar. La primera fase consiste en distribuir las horas de quirófano totales entre las distintas especialidades evaluando tres aspectos, la utilización histórica por especialidad, costos y ganancias por bloque asignado, y por la demanda, es decir por la lista de espera. La segunda etapa se basa en asignar estos bloques a cada quirófano y día de la semana maximizando las preferencias del cirujano y teniendo en cuenta el ALOS esperado de los pacientes, clasificándolos de corta estancia (menor a 5 días) y de larga estancia (mayor a 5 días). Por último, la tercera fase consiste en determinar la secuencia óptima de cirugías dentro de cada bloque. Las dos primeras etapas se resuelven mediante modelos de optimización, modelo tipo *bin-packing* y *block booking* respectivamente, mientras que la tercera fase se determina mediante una simulación. Ambos trabajos exponen que la utilización de modelos de optimización permitieron aumentar la cantidad de cirugías por semana, al mismo tiempo que redujeron la cantidad de horas extras y la reprogramación de cirugías.

Como algunos autores sugieren en sus trabajos, las acciones llevadas a cabo en el quirófano tienen un efecto directo en otras áreas las cuales poseen un recurso crítico para los hospitales. En este sentido Beliën y Demeulemeester, 2007 [8] evalúan una serie de modelos para la construcción de la agenda quirúrgica con una nueva función objetivo: nivelar la ocupación de camas resultantes en un periodo determinado. Se detallan dos tipos de restricciones: las restricciones de demanda asegurando que cada cirujano o especialidad obtenga un número específico de bloques quirúrgicos, y las restricciones de capacidad limitando los bloques disponibles para cada día de la semana. Además, el número de pacientes operados por bloque y la estancia de cada paciente dependen del tipo de cirugía y se consideran estocásticos, siguiendo una distribución binomial. Desarrollaron una serie de heurísticas basadas en MIP y una metaheurística para minimizar la escasez total esperada de camas. En el primer enfoque, la función objetivo no lineal se reemplaza por una lineal (o cuadrática), mientras que el segundo enfoque conserva la función objetivo original y se

resuelve mediante un enfoque metaheurístico. El resultado de su trabajo es construir distintos modelos para un programa maestro de cirugías para el cual se han propuesto modelos que buscan minimizar el pico de ocupación de camas esperado, la varianza más alta de la ocupación de camas o una combinación de ambos. Encuentran mejores resultados mediante el segundo enfoque, sin embargo, estos requieren de un esfuerzo computacional mayor respecto al MIP. Presentan como oportunidad de mejora implementar estos modelos para un caso de la vida real en donde existen otros tipos de restricciones como son las preferencias de cirujanos, disponibilidad de materiales, etc. y poder cuantificar la calidad de las soluciones y los tiempos de cómputo incorporando estas restricciones. Siguiendo en esta línea, Zenteno et al., 2016 [17] formulan un modelo de MIP para resolver uno de los grandes problemas presentados en un reconocido hospital de Boston. La unidad de cuidados postanestésicos presentaba una gran congestión debido a una variabilidad significativa en la ocupación de las camas de los pacientes quirúrgicos entre los días de la semana debido a la práctica utilizada para programar las cirugías electivas, lo cual obligaba a los pacientes a esperar en las salas quirúrgicas generando un cuello de botellas para pacientes que debían comenzar una cirugía. En este hospital, de 54 salas quirúrgicas y 900 camas de internación de las cuales 334 se utilizan para pacientes quirúrgicos, esta problemática generaba que los cirujanos no optimizaran el tiempo de sus bloques, planificaran sus cirugías considerando estos retrasos y por ende utilicen más tiempo del estipulado en sus bloques. Considerando esto, proponen un modelo que reorganiza los bloques quirúrgicos asignados a cada especialidad con el objetivo de nivelar la ocupación de camas entre los días de la semana y disminuir el pico en el censo de internación. Aproximadamente el 21% de los bloques fueron reorganizados. Debido al estado altamente congestionado del sistema, los cambios aparentemente pequeños en el pico promedio del censo se tradujeron en un crecimiento significativo del rendimiento sin aumentar la capacidad de camas para pacientes hospitalizados, y al mismo tiempo un uso eficiente de los recursos del quirófano.

La aplicación de modelos de optimización está revolucionando la toma de decisiones y maximizando la eficiencia en la utilización de recursos disponibles en el sector de salud. Aunque ya ha demostrado su eficacia en diversas aplicaciones, aún se encuentra en una etapa de exploración y desarrollo con un potencial sin límites. Cada vez más instituciones de la industria de la salud cuentan con profesionales especializados en Analytics, y a medida que el acceso a datos de alta calidad mejora, la investigación operativa adquiere una relevancia mayor. Este enfoque está generando un impacto significativo en la mejora de procesos y la

optimización de recursos, y se perfila como un pilar fundamental para el futuro de la toma de decisiones estratégicas en el ámbito de la salud.

2. Buscando la optimización integral de los recursos hospitalarios

Si bien existen grandes avances en la literatura sobre utilización de herramientas de optimización en el ámbito de la salud, la adopción de las mismas en la planificación de los procesos hospitalarios en Argentina viene muy atrasada. Es así que uno de los grandes inconvenientes de la gestión de los recursos se debe a que el armado de la programación quirúrgica se realiza de forma manual. La introducción de herramientas y métodos para optimizar las operaciones de un hospital y principalmente de un servicio quirúrgico presenta hoy en día un gran desafío. El primero es el acceso a datos confiables para su posterior análisis. Para lograrlo, resulta fundamental contar con un sistema hospitalario completamente digitalizado que registre de manera exhaustiva todas las transacciones ocurridas en el centro médico. Por otro lado, como se pudo observar en la sección de revisión de la bibliografía, existen diversos modelos de programación quirúrgica con distintos objetivos y restricciones. Esto se debe a que cada sanatorio u hospital tiene múltiples factores a considerar, como su modelo de negocio, preferencias médicas, tipo de asistencia brindada, infraestructura, entre otros. Además, uno de los mayores inconvenientes surge cuando se intenta optimizar unidades del hospital o sanatorio de manera individual y aislada. Lamentablemente, en muchas instituciones se enfocan en maximizar la utilización de un sector sin considerar el impacto que esto podría generar en el resto de las áreas. Esta falta de enfoque integral desencadena otro problema, ya que las diferentes unidades de un hospital están interconectadas, y su funcionamiento afecta directa o indirectamente al rendimiento de las demás. En línea con este último punto, analizamos la problemática planteada por una de los prestadores privados más prestigiosos de la Capital Federal. El sanatorio en cuestión es una unidad asistencial polivalente que brinda atención a todos los públicos, tanto de forma directa como a través de prepagas u obras sociales. En cuanto a su infraestructura, cuenta con una sala de emergencias con 17 puestos, 123 camas de internación general, alrededor de 30 camas en la unidad cerrada, y una sala quirúrgica con 8 quirófanos, además de otras 4 salas destinadas a partos y cesáreas. Con el fin de entender los patrones de flujo de pacientes en el hospital y la utilización de recursos, incluyendo camas de internación y quirófanos, a continuación, presentamos un análisis detallado de la información proporcionada.

2.1 Exploración de datos

Los datos para el desarrollo de este proyecto fueron brindados por una de las instituciones prestadoras de salud privada más relevantes y prestigiosas de Argentina bajo un acuerdo de confidencialidad. El periodo analizado corresponde a los meses de enero a abril de 2022.

Los datos que analizamos provienen de:

- Reserva quirúrgica: este dataset contiene información de las cirugías que fueron programadas para una cierta fecha en un determinado quirófano. Por cada cirugía hay información del procedimiento, especialidad, cirujano, duración teórica y la condición postoperatoria del paciente, ambulatoria o con internación.
- Cirugías realizadas: este dataset contiene información de todas las cirugías efectivamente realizadas. Al igual que la reserva, este contiene información de la fecha y hora del procedimiento, número de quirófano en donde se llevó a cabo la cirugía, tipo de procedimiento, cirujano, matrícula, condición postoperatoria, fecha de admisión y de alta del paciente.
- Reserva de Emergencias: este dataset contiene información de la demanda del sector de emergencias. Cada registro es una solicitud y para cada una de estas observaciones tenemos información si la solicitud fue aceptada o rechazada por falta de disponibilidad de camas.
- Censo de internación: este dataset contiene información de la ocupación de camas por día, y la cantidad de pacientes que pasaron la noche en una cama ambulatoria por falta de camas de internación.

Como mencionamos anteriormente, y este sanatorio no es la excepción, muchos pacientes compiten por las mismas camas de internación. En el caso de este sanatorio, las 123 camas de internación son utilizadas por tres tipos de pacientes. En primer lugar, están los pacientes clínicos, la mayoría de los cuales ingresan a través del sector de emergencia y, tras su evaluación, el médico tratante determina que necesitan quedarse internados para su recuperación o tratamiento, ocupando una de estas camas. El segundo grupo está compuesto por pacientes obstétricas que, después del parto o cesárea, permanecen en el hospital durante un período de 2 a 3 días. Por último, se encuentran los pacientes quirúrgicos, quienes después

de la intervención quirúrgica requieren permanecer en observación hasta su total recuperación.

Hablando en términos médicos, el principal síntoma que enfrenta la gestión operativa del sanatorio es una fuerte congestión en el flujo de pacientes los días martes, miércoles y jueves. Esta situación ha llevado a rechazar pacientes, suspender cirugías y, en ocasiones, utilizar temporalmente camas que tienen otros usos previstos. Por otro lado, durante los fines de semana, la ocupación de camas disminuye considerablemente, y también se observa una reducción en la demanda por parte de los financiadores, quienes solicitan derivaciones y envían a los pacientes a través de ambulancias. A continuación se muestra la evolución del censo de internación diario desde enero a abril del año 2022, en rojo hace referencia a los días sábados y domingos. Con motivo de las festividades de Año Nuevo y Semana Santa, se ha observado una reducción significativa en la ocupación de camas estos días. Es importante aclarar, como comentamos previamente, que el término censo de internación se refiere al porcentaje de camas ocupadas a la medianoche. Hemos centrado la observación de la ocupación a esta hora en particular, debido a que es altamente probable que si un paciente está ocupando una cama en ese momento, pase la noche en el sanatorio.



Gráfico 1. Evolución diaria del censo de internación de enero a abril de 2022

A continuación, se presenta el registro diario de la demanda de camas para internación clínica por parte de los financiadores, y los rechazos ocurridos. Debido a limitaciones en la disponibilidad de datos, se muestra únicamente el mes de abril.



Gráfico 2. Demanda de camas y rechazos diarios durante el mes de Abril de 2022

Observando la gráfica, podría parecer que la cantidad de pacientes rechazados no es significativa y que, por lo tanto, su impacto es insignificante. No obstante, esta percepción no es del todo precisa, ya que cada rechazo conlleva no solo una pérdida económica sino también un deterioro en la reputación del sanatorio. Además, la magnitud de los rechazos es implícitamente mayor, dado que cuando un paciente es rechazado, el financiador tiende a buscar otras instituciones para futuras derivaciones, lo que incrementa el flujo de pacientes hacia otros centros médicos.

No hay que dejar de mencionar que esta institución presenta una elevada actividad quirúrgica, por lo cual, dada la situación económica, si el objetivo es maximizar el uso de los recursos, sean camas de internación y/o quirófanos, hay varias razones para considerar un modelo de programación quirúrgica que no sólo evalúe la productividad en el área quirúrgica, sino también el impacto que pueda tener en el censo de internación. Esto puede resultar en beneficios significativos tanto en el rendimiento de los recursos como en la calidad de la atención prestada.

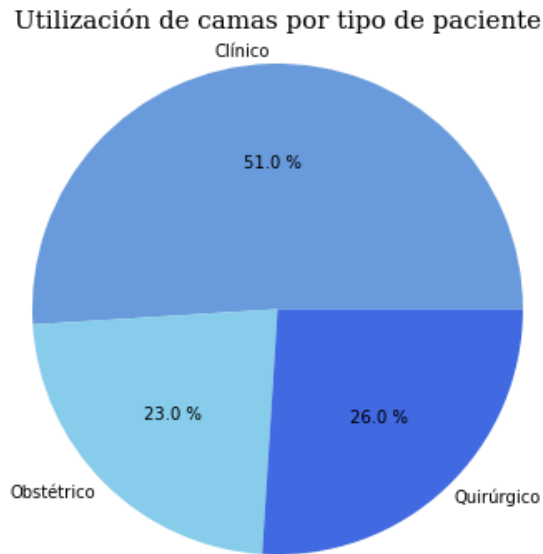


Gráfico 3. Distribución de camas por tipo de paciente

Siguiendo nuestro análisis, observamos cómo se distribuyen las 123 camas de internación general entre los pacientes clínicos, quirúrgicos y obstétricos. A partir de los datos brindados, puede verse a continuación que apenas un poco más de la mitad de las camas son ocupadas por pacientes clínicos, mientras que las camas restantes se dividen casi equitativamente entre pacientes quirúrgicos y obstétricos.

Este aspecto es de suma importancia al considerar un modelo que busque optimizar ambos recursos. Además, la distribución implícita de las camas refleja la voluntad de la institución a ofrecer una variedad de servicios de atención médica en lugar de enfocarse exclusivamente en ser un centro quirúrgico o de atención clínica, aún cuando pudiera resultar más conveniente económicamente enfocarse en un tipo de servicio en particular.

Por otro lado, resulta interesante analizar la contribución de pacientes quirúrgicos y obstétricos al censo de internación por día de la semana, para comprender su impacto en la variabilidad de la demanda de camas hospitalarias. En este sentido, la organización ha manifestado una tendencia en la demanda de camas en relación con la programación de cirugías y procedimientos obstétricos, y la duración de estadía promedio (ALOS).

Según los datos recolectados, se ha constatado que durante los días intermedios de la semana, la cantidad de pacientes que ocupan una cama es mayor en comparación con los fines de semana. En particular, los días miércoles y jueves se registran los mayores índices de ocupación, mientras que los sábados, domingos y lunes se evidencia una disminución en la

misma. Este comportamiento se evidencia tanto para los pacientes quirúrgicos como obstétricos.

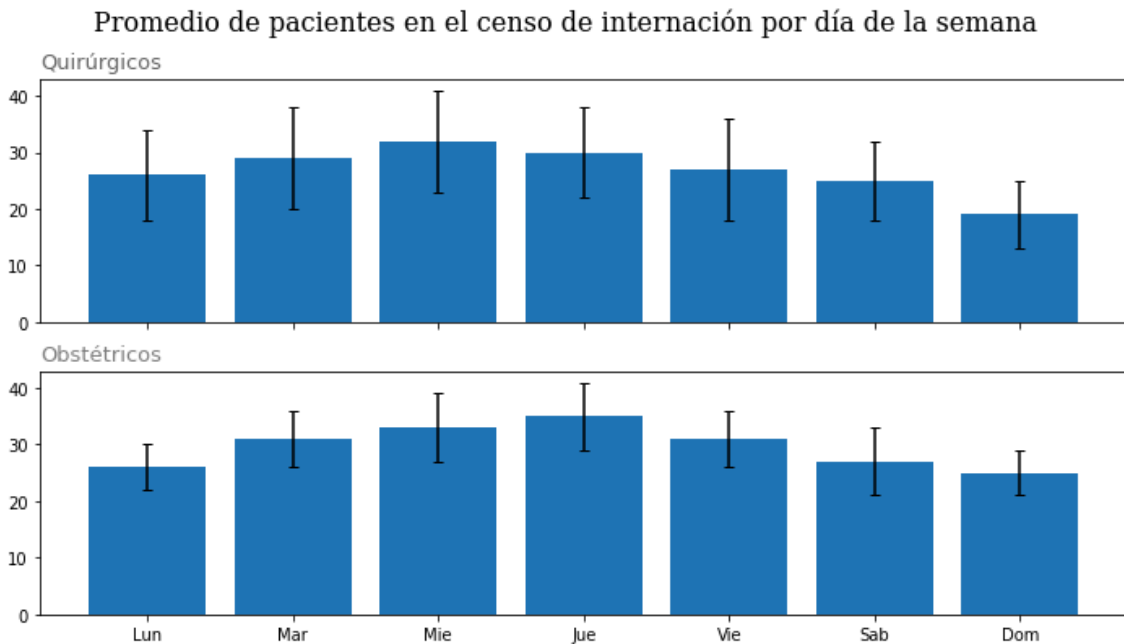


Gráfico 4. Aporte de pacientes quirúrgicos y obstétricos al censo de internación por día de la semana

Con los datos analizados hasta el momento y observando el Gráfico 1 del censo de internación, podríamos pensar que el margen a optimizar es chico, sin embargo podemos encontrar una interesante comparación con la gestión de las aerolíneas. En la industria de la aviación, uno de los principales objetivos de una aerolínea es asegurarse de que cada vuelo despegue con todos sus asientos vendidos. Esto se debe a que cada asiento vacío representa una pérdida de ingresos y una disminución de la rentabilidad. Si bien nuestro trabajo no está enfocado en resolver un problema de Revenue Management, lo utilizaremos como analogía. Cada pasajero a bordo contribuye a cubrir los gastos operativos, de manera similar, en el ámbito de la salud, cada cama de internación disponible es un recurso valioso que debería ser utilizado de manera eficiente ya que cada cama vacía representa costos hundidos significativos para las organizaciones.

Nuestra intención de trabajar sobre la programación quirúrgica se basa en la naturaleza de los tres tipos de pacientes que utilizan las camas: obstétricos, clínicos y quirúrgicos. En el caso de los pacientes obstétricos, la demanda es inmodificable debido a su componente aleatorio, y además al ser referente en la especialidad la institución se compromete a no rechazar a ningún paciente de este tipo. En cuanto a los pacientes clínicos, su demanda está

intrínsecamente relacionada con la situación de salud de cada paciente, lo que hace que cualquier modificación sea impredecible. Por lo tanto, la única área donde tenemos margen para trabajar de manera efectiva, o mejor dicho, por dónde podríamos comenzar el análisis es en el grupo de pacientes quirúrgicos.

Avanzando en la evaluación, nos adentraremos en los datos relativos a la planta quirúrgica. Los datos presentados a continuación representan exclusivamente procedimientos quirúrgicos, sin incluir procedimientos obstétricos.

En primer lugar, se obtuvo la producción de la planta quirúrgica por mes, donde puede verse que por periodo vacacional los dos primeros meses presentan una disminución de la actividad quirúrgica mientras que los meses de marzo y abril muestran valores más consistentes con la producción mensual.

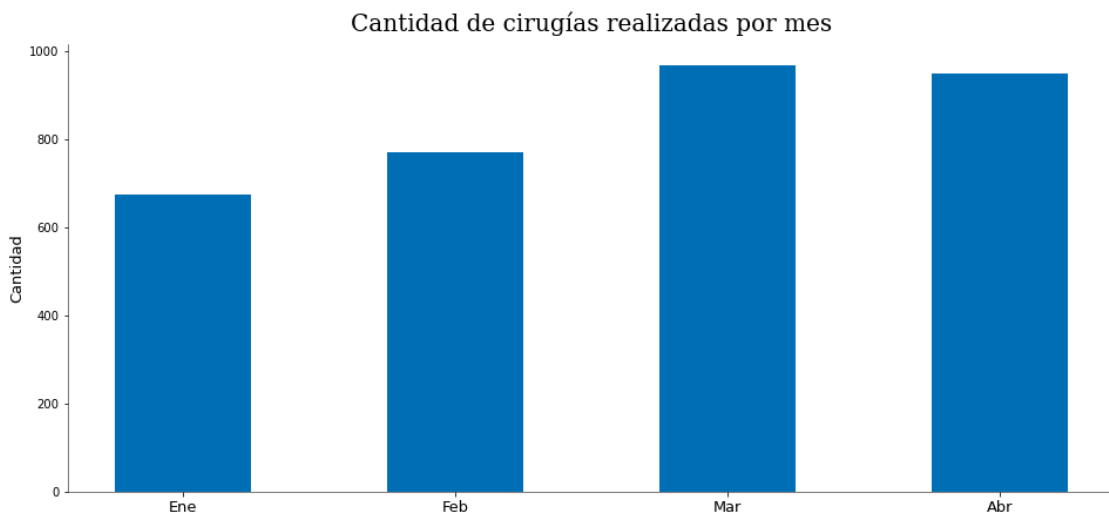


Gráfico 5. Cantidad de cirugías por mes

Por otro lado, a continuación observamos el porcentaje acumulado de cirugías realizadas por día de la semana, con el objetivo de ver su distribución y entender si además de la estancia hospitalaria existe otro factor que contribuye a generar cuellos de botellas los días intermedios de la semana. Como se puede ver, los días martes, miércoles y jueves son los días que se realizan más procedimientos. Además, aproximadamente el 90% de las cirugías se realiza antes del sábado.

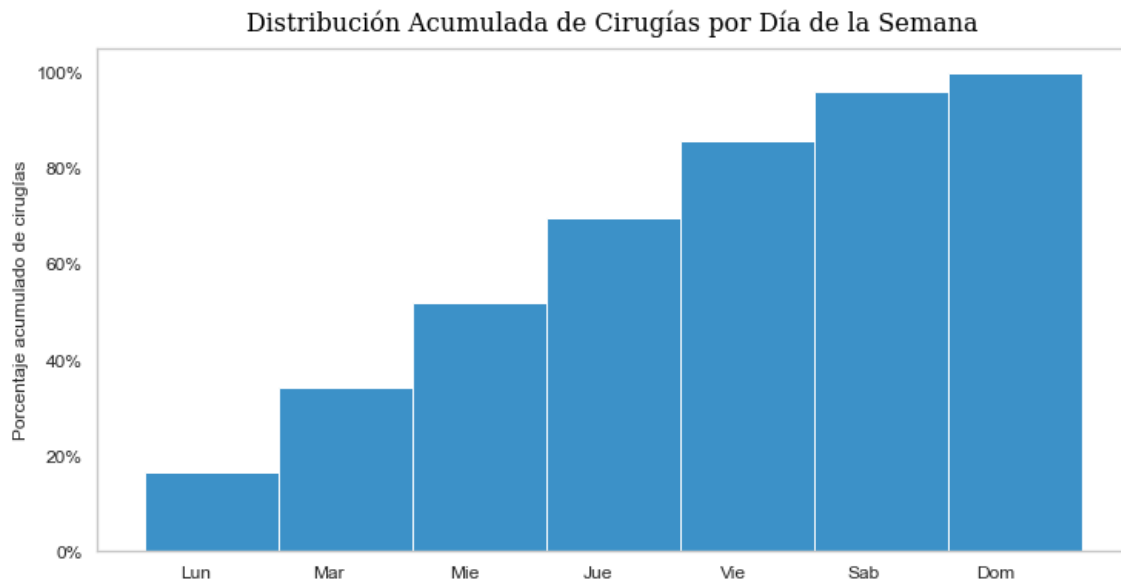


Gráfico 6. Porcentaje acumulado de cirugías realizadas por día de la semana

Según la información proporcionada por la institución, la planta quirúrgica de este sanatorio opera en un modelo abierto, lo cual significa que los cirujanos que realizan procedimientos en la institución son externos a la misma. Cada profesional debe reservar horas de quirófano para llevar a cabo sus cirugías, pero es importante destacar que algunos de estos cirujanos tienen un acuerdo con la institución que les otorga un tiempo reservado en un quirófano y día específico cada semana. Este enfoque de programación quirúrgica es parte de un sistema de agendamiento mixto, que combina bloques fijos asignados a cirujanos con la flexibilidad de programar cirugías adicionales según la demanda en el tiempo restante. Los bloques fijos asignados a cirujanos representan un 63.45% de la agenda, equivalente a 365.5 horas de 576 horas programables semanalmente. Esto considera un horario de operación de 7 am. a 7 pm., seis días a la semana de lunes a sábado, y 8 quirófanos disponibles. La cantidad de cirujanos que operaron al menos una vez en el periodo analizado fueron 412, de los cuales 45 corresponden a los que tienen bloques quirúrgicos fijos.

Nos resultó interesante analizar también cómo se distribuye la programación quirúrgica entre las diferentes especialidades y qué porcentaje de esas cirugías se realizaron dentro de Bloques quirúrgicos fijos. Si bien se determinaron 31 especialidades distintas, las 10 especialidades que representan el 80% de las cirugías realizadas son las siguientes:

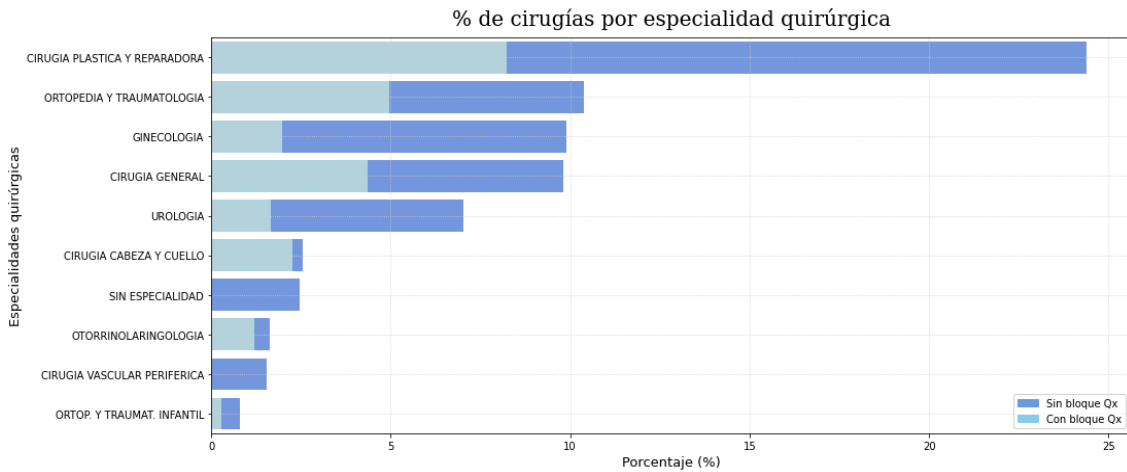


Gráfico 7. Porcentaje de cirugías por especialidad quirúrgica, realizadas dentro y fuera de bloques.

Por otro lado, analizamos cómo se distribuye la agenda de acuerdo a la proporción de cirugías ambulatorias vs. cirugías que requirieron camas de internación:

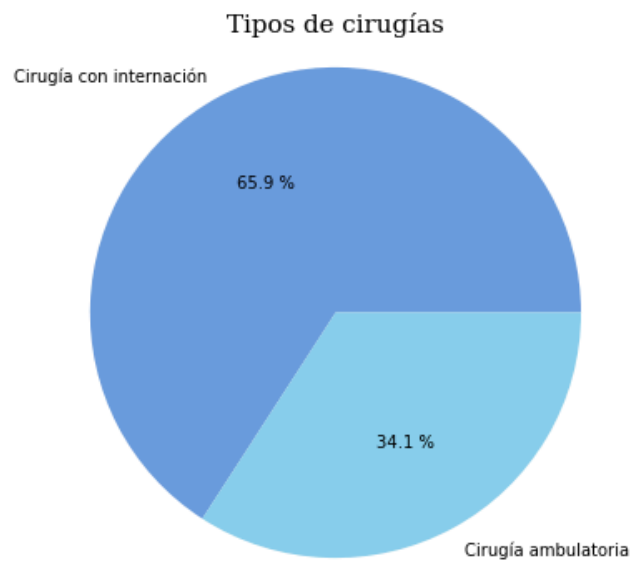


Gráfico 8. Distribución de cirugías por condición post operatorio

De las cirugías que requirieron internación, la distribución respecto al sector de internación muestra que la actividad quirúrgica del sanatorio tiene un fuerte impacto en las camas de internación general:

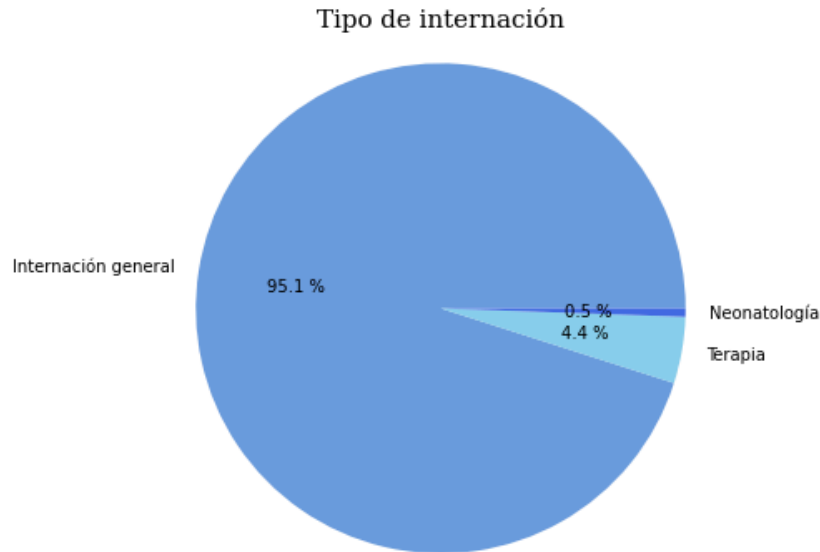


Gráfico 9. Distribución de cirugías por tipo de internación

Es importante tener en cuenta la proporción entre cirugías programadas y no programadas en el conjunto de datos. A pesar de que el dataset no incluye un atributo específico para distinguir entre estos dos tipos de cirugías, se ha observado que en el funcionamiento de los sanatorios, especialmente en los de carácter privado, los pacientes programados rara vez son admitidos con más de 12 horas de anticipación antes de su cirugía. Por lo tanto, hemos clasificado como cirugías no programadas aquellas en las que los pacientes fueron admitidos con más de un día de anticipación. Este grupo engloba a todos los pacientes que ingresaron debido a condiciones médicas no relacionadas con cirugías y que, durante su estancia, requirieron una intervención quirúrgica por diversas razones. Esta distinción es fundamental para excluir del cálculo de ALOS a estos pacientes, cuya inclusión distorsiona la métrica.

Proporción de cirugías programadas vs. no programadas

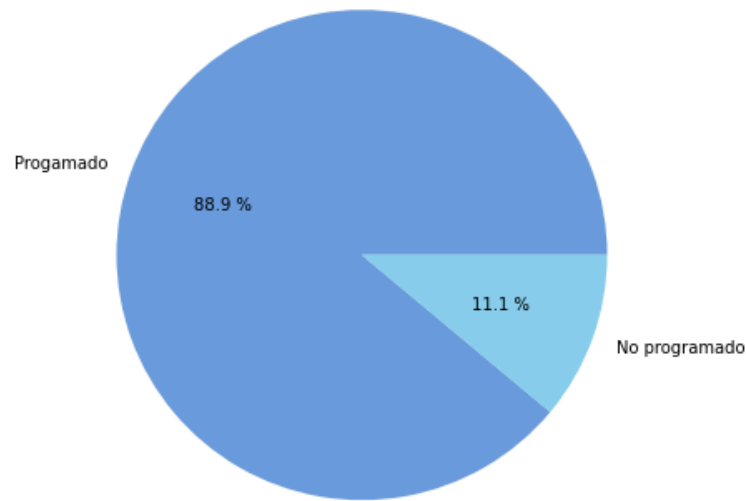


Gráfico 10. Distribución de cirugías programadas vs. no programadas

Finalmente, utilizamos la información de las fechas de admisión y alta hospitalaria para determinar la duración en días de la estadía hospitalaria de los pacientes que se sometieron a una cirugía programada. A continuación, presentamos una distribución acumulada de estas cirugías, en la que se destaca que el 98% de ellas tuvo una estancia de menos de 8 días.

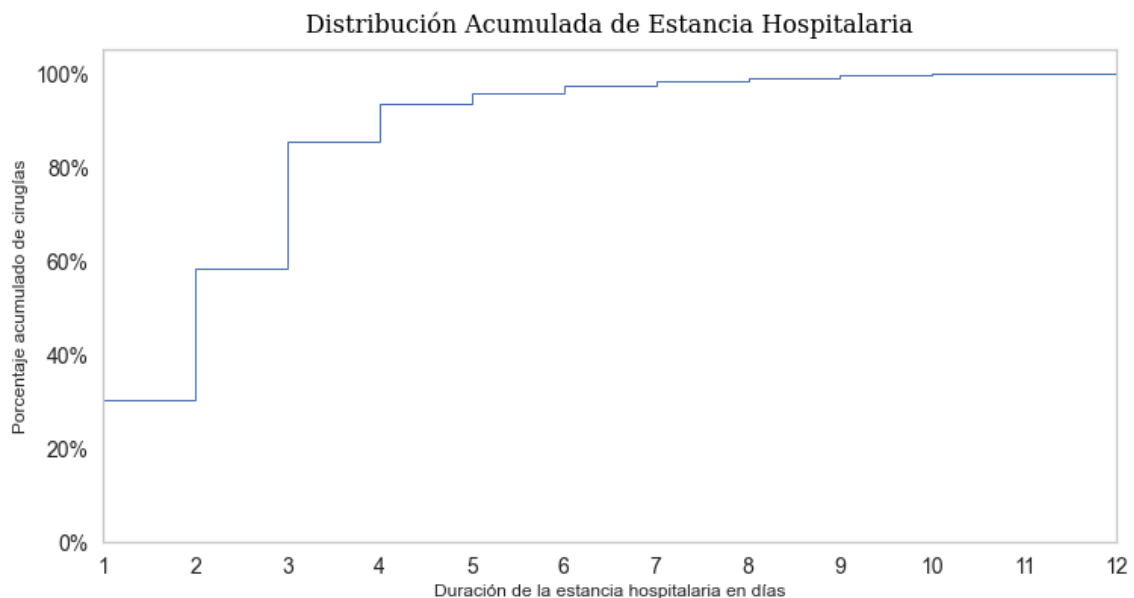


Gráfico 11. Distribución acumulada de la estancia hospitalaria.

Dadas las consideraciones anteriores, es imprescindible reevaluar el sistema de programación de cirugías. Si nuestro objetivo es optimizar el flujo en la atención de pacientes, prevenir congestiones en días intermedios de la semana y mejorar la eficiencia en la utilización de nuestros recursos, todo ello sin comprometer el equilibrio del mix de pacientes requerido por la institución y las políticas institucionales, repensar la forma en que se programan los procedimientos quirúrgicos podría desempeñar un papel fundamental en el aumento de la rentabilidad y mejora en la calidad de atención brindada.

3. Resolviendo el desafío operativo

En respuesta a los desafíos operativos que hemos mencionado previamente, proponemos como alternativa a la programación manual la implementación de una agenda quirúrgica basada en un modelo de optimización táctica. A través de este enfoque data-driven, nuestro objetivo es proporcionar una herramienta que permita determinar el día y la hora en que cada cirujano llevará a cabo sus procedimientos. Esto no solo garantizará la alta productividad de los quirófanos en nuestro sanatorio, sino que también contribuirá a una mejor utilización de las camas de internación a lo largo de la semana.

3.2 Preguntas a resolver

En este trabajo, nos hemos propuesto responder los siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son las ventajas de utilizar técnicas de analytics prescriptivo en la planificación quirúrgica en comparación con el enfoque manual? Para ello, compararemos los resultados de nuestro modelo con lo que fue la programación de abril del 2022.
- ¿Es factible, a partir de una nueva planificación quirúrgica, mejorar la utilización de los recursos de manera integral?
- ¿Cuál es el potencial beneficio económico de nuestro modelo? Para esto, evaluaremos el impacto de nuestro modelo en el censo de internación de abril del 2022.

3.3 Propuesta de modelo

El enfoque de nuestra propuesta es generar una planificación quirúrgica, pero no se limita únicamente a la mejora de la programación de cirugías electivas o programadas. Más allá de ello, implica una planificación integral y estratégica que coordina eficazmente el quirófano con el uso de las camas de internación. El objetivo central es maximizar los ingresos, resultado de una optimización de los recursos hospitalarios instalados. Para lograr esto, nuestra propuesta incorpora un parámetro crítico, del cual hablamos previamente, el ALOS. ¿Por qué

consideramos que este parámetro es muy importante?. Para responder a esa pregunta y comprender su relevancia, analicemos el impacto que tiene la asignación de los distintos bloques quirúrgicos y sus respectivos ALOS en el censo de internación mediante el siguiente ejemplo. Consideremos una institución con 6 camas de capacidad. Además, en la planta quirúrgica operan tres cirujanos: el primero de ellos tiene un bloque los lunes en donde, en promedio, realiza tres procedimientos cada lunes. Los pacientes permanecen en promedio cuatro días, es decir, el ALOS del bloque es cuatro. Por otro lado, el segundo cirujano opera los martes a un paciente con estancia promedio de cinco, y por último, el tercer cirujano opera los miércoles en promedio dos pacientes con ALOS de tres. Como resultado de esta programación, a continuación, se presenta el impacto que generaría en el censo de internación:

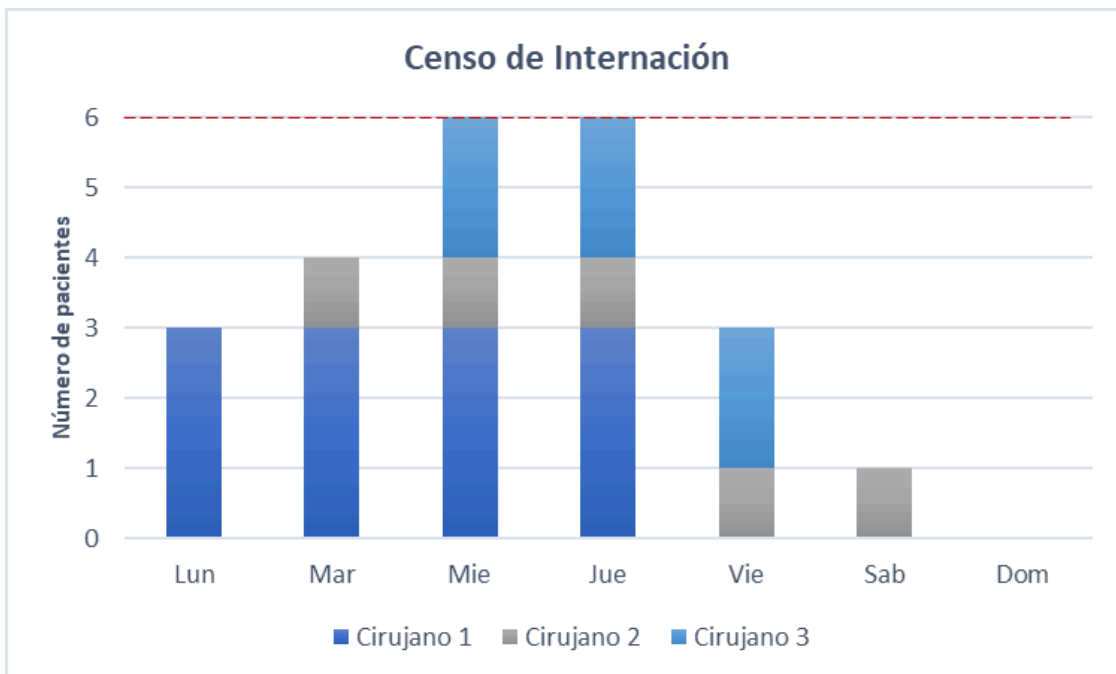


Figura 2. Censo de internación para la planificación quirúrgica 1.

Como podemos observar tanto el miércoles como jueves llegamos a utilizar la totalidad de camas disponibles, mientras que el resto de los días queda capacidad ociosa. Si a esto le sumamos que la demanda de camas por parte de los financiadores es alta los días intermedios de la semana y casi nula los fines de semana, como vimos previamente, podríamos asegurar que tanto el miércoles como jueves cualquier solicitud sería rechazada. Siguiendo con el ejemplo, veamos qué pasa si tan solo modificamos el día en que opera uno de los cirujanos, en particular, el cirujano tres pasa de operar los miércoles a operar los viernes. El censo se vería de la siguiente manera:

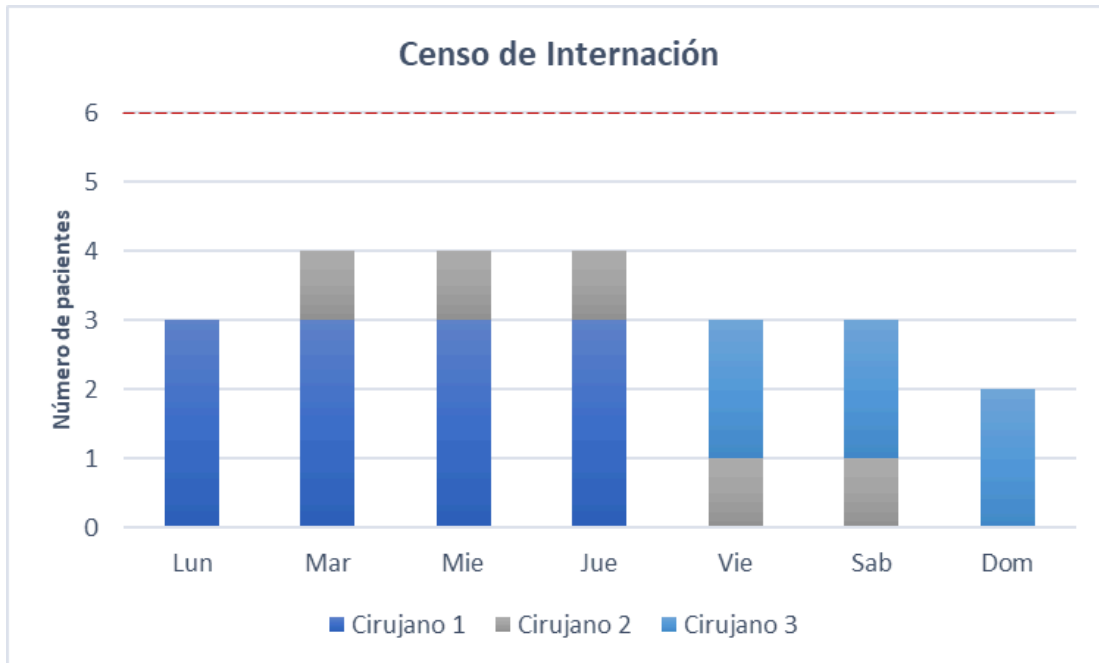


Figura 3. Censo de internación para la programación quirúrgica 2

Mediante esta segunda programación, tanto martes, miércoles y jueves se podría aceptar hasta dos pacientes más, y además, mejorar la utilización de camas los fines de semana. Este es un ejemplo chico, sin embargo, podemos imaginar el impacto que la asignación tiene cuando consideramos el total de los cirujanos.

Esta ilustración ejemplifica cómo la asignación de bloques y la estancia promedio de los procedimientos pueden influir significativamente en la ocupación de camas de internación. En la práctica, nos encontramos con una variedad de restricciones, entre las cuales se encuentra la imposibilidad de realizar cambios en la programación de todos los cirujanos. Sin embargo, en breve discutiremos cómo es posible realizar cambios en la programación de algunos de ellos.

En línea con lo expuesto anteriormente, nuestra estrategia se centra en la planificación táctica, donde buscamos identificar oportunidades sustanciales para la optimización integral de los recursos. Para alcanzar este objetivo, realizamos una modelización matemática del problema y, mediante el uso de MIP diseñamos una agenda quirúrgica que abarca un horizonte de tiempo semanal, que se repite regularmente por un período determinado por la institución (por ejemplo, 6 meses o 1 año). Nuestro enfoque permitirá al usuario responsable de la gestión de la planificación introducir los datos necesarios, los cuales abordaremos a continuación, y obtener el día y horario en que se asignará tiempo de quirófano a cada cirujano dentro de la semana.

Para continuar con la propuesta de nuestro modelo y detallar cómo abordaremos el problema, es esencial primero discutir las restricciones operativas que enfrentamos. Como mencionamos previamente, la agenda que desarrollaremos tiene un horizonte de tiempo semanal, y debido a la programación habitual de la institución, tenemos la capacidad de asignar bloques quirúrgicos durante seis días a la semana, de lunes a sábado. Además, en función de los recursos disponibles cada quirófano tiene una franja horaria durante el cual se encuentra operativo, definida por un horario de apertura y un horario de cierre, lo que permite programar hasta 12 horas en cada quirófano cada día. La mínima unidad de tiempo para un bloque quirúrgico es de una hora, por lo que la agenda estará discretizada en intervalos discretos de una hora.

Es importante señalar que en este trabajo nos enfocamos exclusivamente en procedimientos quirúrgicos sin incluir salas quirúrgicas para cesáreas o partos. En consecuencia, disponemos de ocho quirófanos disponibles para nuestra planificación. Además, en el contexto de las restricciones edilicias, disponemos de una capacidad total de 123 camas de internación. Como mencionamos anteriormente, estas camas son compartidas también por pacientes clínicos y obstétricos. Por lo tanto, hemos calculado el promedio de ocupación diaria de estas dos categorías de pacientes a lo largo de la semana, y consideramos las camas restantes como nuestra capacidad disponible para pacientes quirúrgicos. Esta suposición se basa en una aclaración comentada previamente, tanto los pacientes clínicos como los obstétricos presentan una demanda aleatoria, a su vez buscamos respetar la política de atención de la institución. Cabe destacar que, más allá de estas particularidades, la metodología puede ser adaptada convenientemente de manera simple para obtener una planificación general o, incluso, realizar otras adaptaciones.

A partir de la información brindada por el sanatorio y tras consultas con los responsables, hemos analizado las características de la distribución de la agenda en relación a los cirujanos. Esto servirá como base para la implementación de nuestro modelo de optimización. En este sentido, hemos identificado tres grupos de cirujanos:

1. Cirujanos que, por acuerdo con la institución, tienen reservada una franja de tiempo específica para programar sus cirugías, uno o más días a la semana, todas las semanas. A partir de este punto, denominaremos a esta franja de tiempo bloque quirúrgico. Como mencionamos previamente, hay un total de 45 cirujanos en este grupo, y algunos de ellos pueden tener uno o más bloques en la misma semana.

2. Cirujanos que no cuentan con un bloque quirúrgico formal todas las semanas, pero realizan al menos un procedimiento semanalmente.
3. Cirujanos que operan con frecuencia muy baja. Este grupo está compuesto por un número considerable de cirujanos, que cambia todas las semanas.

Es relevante destacar que, tras las conversaciones, hemos determinado que dentro del grupo 1 contamos con 11 cirujanos a los cuales no podremos modificar el día que tienen asignados sus bloques, y además, para la institución es importante minimizar los cambios en los bloques de los 34 cirujanos restantes.

Notación

Antes de formalizar nuestro modelo, es fundamental establecer la notación matemática que nos permita expresar de manera precisa las variables, parámetros y restricciones del problema.

Para cada día de la semana $d \in D$, donde D representa el conjunto de días de la semana, formalmente, $D = \{1, \dots, 7\}$, y para cada quirófano denotado por $q \in Q$, donde $Q = \{1, \dots, 8\}$ representa el conjunto de quirófanos, hemos discretizado el tiempo de la agenda quirúrgica en slots de una hora, por lo tanto, denominamos con T al número de slots totales en un día por quirófano y llamamos t al slot, donde $t \in \{1 \dots T\}$. Cabe aclarar que cada t define el inicio del slot.

Por otra parte, llamamos B al conjunto de todos los bloques quirúrgicos, donde utilizamos el índice i para denotar cada bloque en el conjunto, tal que, $i \in B$. A su vez, definimos a $bf \subset B$ como un subconjunto correspondiente a los bloques del grupo 1: son bloques de cirujanos que por acuerdo con la institución tienen asignados días determinados de la semana. Para ello, llamamos $df(i)$ al día de asignación del bloque $i \in bf$. Cabe aclarar que, luego de las charlas con referentes de la gestión nos informaron que dentro del conjunto bf hay bloques de cirujanos a los cuales no podremos modificar ese día de asignación, por ello, llamamos $bInam$ a este conjunto de bloques inamovibles, tal que $bInam \subseteq bf$. Por otro lado, definimos $ba \subset B$ al subconjunto correspondiente a los bloques del grupo 2: aquellos cirujanos que tienen una frecuencia de operaciones semanal alta, y por último, $bs \subset B$ al subconjunto de bloques correspondientes al grupo 3.

A continuación se muestra una representación gráfica del conjunto B y sus subconjuntos.

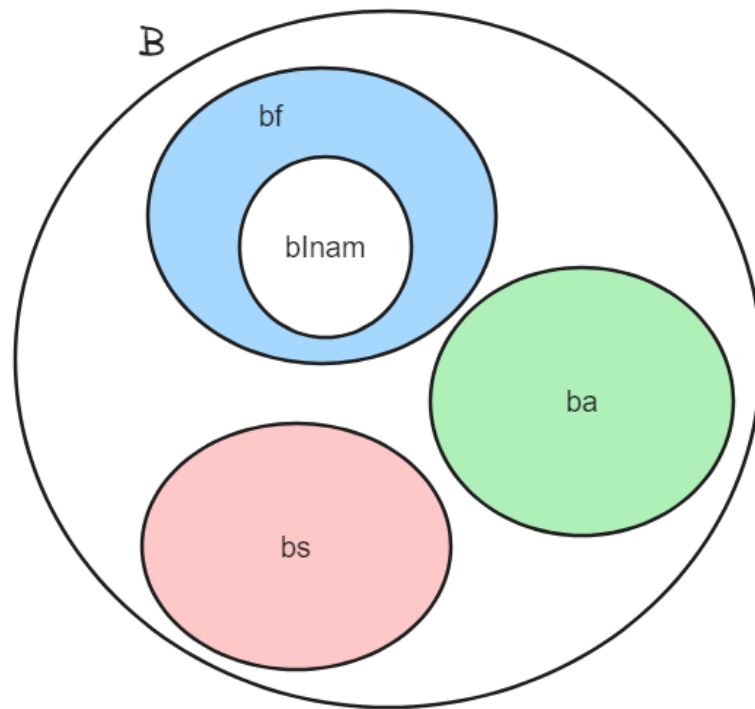


Figura 4. Representación gráfica del conjunto B y sus subconjuntos.

Continuando con la notación, cada uno de estos bloques i se definen por n_i : cantidad de cirugías realizadas en dicho bloque, y una duración de bloque denominada e_i en números de intervalos consecutivos de utilización del quirófano. Asimismo, cada uno de estos bloques, dependiendo si la cirugía es con internación o no, generan una demanda de camas directamente relacionada con la estancia hospitalaria de las cirugías en el bloque. Para este propósito, introducimos el parámetro $D_{camas_i}(d)$ como una función constante a trozos no creciente, que puede tomar como máximo 7 valores en el dominio, uno para cada día de la semana. Dado que dentro de un bloque de un mismo cirujano pueden llevarse a cabo cirugías de distintos tipos con diferentes ALOS, la combinación de estas cirugías genera el consumo de camas por día. Este consumo de camas lo representamos mediante dicha función. Es importante mencionar que el primer valor de la función corresponde al día en que se asigna el bloque, y los valores subsiguientes corresponden a los días consecutivos a partir de ese momento.

En relación a la disponibilidad de camas en el sector de internación general para pacientes quirúrgicos, hemos definido un conjunto denominado C_d que representa la capacidad promedio de camas para cada día de la semana. Estos valores se calculan restando la utilización promedio de pacientes clínicos y obstétricos de la cantidad total de camas

disponibles. Esto es dato para el modelo y lo definimos de la siguiente manera: [30,27,27,28,30,40,40].

Finalmente, definimos el conjunto R como el conjunto de cirujanos, y $BD(r) \subseteq B$ al conjunto de bloques del cirujano r , tal que $r \in R$. Esta notación es esencial, ya que, como mencionamos previamente, hay cirujanos que tienen más de un bloque, y es importante garantizar que estos no se asignen en el mismo día.

4. Modelo matemático

Ahora abordaremos el modelo matemático propuesto, donde presentamos en detalle las variables, restricciones y la función objetivo que se emplean en este estudio. El análisis se enfoca en dos variables claves: en primer lugar la variable binaria z_{iqtd} que toma el valor 1, si y sólo si, el bloque i se asigna en el quirófano q , iniciando en el slot t , el día d , y 0 en otro caso. Por otro lado, presentamos a la variable y_i como variable binaria que toma valor 1, si y sólo si, el bloque $i \in bf$ experimenta un cambio en el día de su asignación, y 0 en otro caso.

Modelo 1

$$\max \sum_{i \in B} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} z_{iqtd} - \alpha * \sum_{i \in bf} y_i \quad (1)$$

$$S.T. \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} z_{iqtd} = 1 \quad \forall i \in (bf \cup ba) \quad (2)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} z_{iqtd} \leq 1 \quad \forall i \in bs \quad (3)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{t' \in T: t' \leq t \leq t' + e_i} z_{iq't'd} \leq 1 \quad \forall q \in Q, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (4)$$

$$z_{iqtd} = 0 \quad \forall i \in B, \forall d \in D, \forall q \in Q, \forall t \in T: t + e_i > T \quad (5)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{i \in BD(r)} z_{iqtd} \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall r \in R \quad (6)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d' \in D: d' \leq d} z_{iqtd'} * Dcama_{i(d-d'+1)} +$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d' \in D: d' > d} z_{iqtd'} * Dcama_{(D-d'+d+1)} \leq Cd \quad \forall d \in D \quad (7)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D, d=df(i)} z_{iqtd} = 1 \quad \forall i \in bInam \quad (8)$$

$$y_i = \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D, d \neq df(i)} z_{iqtd} \quad \forall i \in bf \quad (9)$$

$$z_{iqtd} = 0 \quad \forall i \in B, \forall q \in Q, \forall t \in T, \forall d \in D: d = 7 \quad (10)$$

$$z_{iqtd} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, \forall q \in Q, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (11)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in bf \quad (12)$$

Las restricción (2) establece que todos los bloques de los subconjunto *bf* y *ba* deben asignarse, ya que corresponden a los bloques de los cirujanos de los grupos 1 y 2, mientras que la restricción (3) indica que no todos los bloques en el subconjunto *bs* necesariamente deben ser asignados. Por otro lado, se requiere aplicar una restricción para evitar la asignación simultánea de dos o más bloques quirúrgicos en un mismo quirófano y en un mismo intervalo de tiempo. La restricción (4) se establece con el propósito de lograr dicho objetivo. Es importante mencionar que, mediante esta restricción implicamos una restricción más débil que evita que dos bloques quirúrgicos se inicien en el mismo slot *t*. Como mencionamos, hay una cantidad de slots disponibles por quirófano, es por ello que, para cada día de la semana y para cada quirófano la restricción (5) establece que el último bloque asignado que comienza en *t* y tiene una duración igual a *e* no supere el máximo de slots, en tal caso la variable z_{iqtd} debe ser igual a cero. Implícitamente, mediante la ecuación (4) y (5) aseguramos que la suma de slots agendados no supere al máximo establecido por quirófano.

Como mencionamos anteriormente, es posible que un mismo cirujano tenga varios bloques programados en la semana. Por lo tanto, para cada conjunto de bloques de un mismo cirujano $BD(r)$, es importante asegurarnos de que estos bloques no se asignen en el mismo día. Esta restricción está definida por la ecuación (6). A continuación, le sigue la ecuación (7) que tiene por objetivo garantizar que, para cada día *d*, la demanda de camas dada por la

programación quirúrgica no supere la capacidad disponible de camas para ese día C_d . Dado que la planificación es periódica con un período semanal, es importante que el censo de internación contemple al mirar un día específico, no solo la demanda de camas de cirugías realizadas ese día o días previos, sino también, cirugías con un índice mayor pero de la semana previa. Es decir, si por ejemplo se está evaluando el día martes, entonces se tiene que considerar la demanda de camas por cirugía realizadas el martes, lunes de esa semana, y por toda cirugía realizada a partir del miércoles de la semana previa cuyo ALOS llegue hasta ese día. Cabe aclarar que la función de uso de camas D_{camas} nunca considera más de 7 días, lo que respalda la aplicabilidad de este enfoque. Para ello, es necesario contemplar dos escenarios, el primero mediante en el cual el día en que se asigna el bloque d' precede o es igual al día que se observa el censo de internación d . En tal caso, la distancia entre d y d' es $(d - d' + 1)$, y por lo tanto la demanda de camas para el día d de un bloque i que se asigne en d' es igual al valor de la función en $D_{camas}_{i(d-d'+1)}$. Por ejemplo, si observamos cual es la demanda de camas el día viernes $d = 5$ por una cirugía que se programa el martes $d' = 2$, y tiene una función de demanda de camas dada por: 4,3,2,1,0,0,0. Recordando que el primer valor de la función corresponde al día de asignación, entonces, ese bloque demanda el valor de la función en la posición $(5-2+1=4)$ lo que equivale a 1 cama. El segundo escenario, contempla el caso en que el bloque se asigne posterior al día en que se observa el censo de internación. En tal caso, la distancia entre d y d' está dado por $(D - d' + d + 1)$. Esta segunda opción, además, considera el caso en que la estancia hospitalaria del bloque supere el tiempo de ciclo D . Lo cual es necesario para nuestro enfoque, ya que buscamos realizar una programación quirúrgica que se repita todas las semanas.

La ecuación (8) se utiliza para fijar las variables correspondientes a los bloques de cirujanos que forman parte del subconjunto bI_{nam} . Estos bloques se caracterizan por tener días de asignación predefinidos $df(i)$, y no pueden ser modificados en el proceso de programación quirúrgica. La ecuación (9) define a la variable y_i implicada por z_{iqtd} . Toma valor 1 si alguno de los bloques $i \in bf$ se asigna un día distinto al día predefinido. La ecuación (10) establece que no se pueden asignar o programar bloques quirúrgicos los domingos. Por último las ecuaciones (11) y (12) definen a z_{iqtd} y y_i como binarias.

Mediante la ecuación (1) establecida como función objetivo se busca maximizar la asignación de bloques, disminuyendo la cantidad de movimientos de los bloques correspondientes al conjunto bf . Como comentamos, hay bloques dentro de este conjunto que no podemos modificar y que fijamos sus variables. Entonces, esta función objetivo minimiza los

cambios de todos aquellos bloques bf que no están en $bInam$. Por su parte, α es un parámetro a ajustar experimentalmente en función del peso de cada término de la función, permitiendo realizar un análisis de sensibilidad según los requisitos del negocio.

5. Experimentos computacionales

En el capítulo previo, se presentó el modelo matemático de optimización basado en MIP. Este modelo es desarrollado con el objetivo de generar una programación quirúrgica semanal y cíclica, teniendo en cuenta la demanda de camas generada a partir de dicha programación para maximizar el uso de los recursos de la institución. Este capítulo tiene como objetivo presentar y analizar los distintos experimentos computacionales realizados, los resultados numéricos y las soluciones que el modelo de optimización ha generado en respuesta a las distintas instancias del problema. A través de tablas y gráficos descriptivos, se mostrará cómo el modelo puede influir en la toma de decisiones y la gestión operativa.

5.1 Experimento basado en valores promedios

El primer experimento que llevamos a cabo consistió en el armado de una programación quirúrgica a partir de valores promedios. Utilizando el *modelo 1* generamos una agenda quirúrgica semanal en donde determinamos el día, hora y quirófano para cada uno de los bloques quirúrgicos. Es decir, como hemos mencionado previamente, cada bloque quirúrgico se caracteriza por su duración en términos de slots, la cantidad de cirugías programadas en el bloque y el ALOS, que resulta de la combinación de cirugías realizadas en dicho bloque. Entonces, en este proceso, utilizamos los datos del conjunto de datos correspondientes a los meses de enero a marzo, y considerando los procedimientos programados construimos la instancia, en donde, los 3 grupos de bloques quirúrgicos se conformaron de la siguiente manera:

Construcción de la instancia

Para el primer grupo de cirujanos, que cuentan con uno o más bloques fijos cada semana, consideramos la duración teórica del bloque asignada por la institución. Posteriormente, calculamos la cantidad promedio de cirugías realizadas en ese bloque durante el periodo de enero a marzo, junto con la estancia promedio de dichos procedimientos.

En cuanto al segundo grupo de cirujanos, quienes no disponen de un bloque formal, pero como mencionamos previamente, llevan a cabo al menos un procedimiento semanal o cuatro procedimientos mensuales, creamos bloques tomando como base la duración promedio

utilizada semanalmente, la cantidad promedio de cirugías realizadas y el ALOS de esos procedimientos en el mismo periodo. Esta estrategia de agrupar cirugías en bloques ayuda a evitar la dispersión de programación a lo largo de la semana, consolidando procedimientos en días específicos. De esta forma, se optimiza la organización y se minimiza la fragmentación de las agendas, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos y del tiempo de los profesionales involucrados. Finalmente, dado que el tercer grupo está compuesto por un numeroso grupo de cirujanos que asisten de manera irregular, generamos un gran número de bloques utilizando diferentes combinaciones de duración, cantidad de cirugías y ALOS, teniendo en consideración el análisis histórico de los datos en este grupo. De estos bloques generados, seleccionamos aquellas combinaciones que se presentan con mayor frecuencia, replicando las combinaciones y respetando la proporción en que aparecían en la base de datos utilizada. El objetivo es modelar la potencial demanda de uso de los quirófanos. Como se explicará más adelante, el modelo decidirá cuáles de esos bloques asignará.

Es relevante destacar que, para tener en cuenta el tiempo de limpieza entre cirugías, hemos incorporado un tiempo fijo destinado a la limpieza en la duración de cada procedimiento. Por otro lado, al construir la instancia, consideramos todos los procedimientos realizados durante el período especificado, sin importar el tipo de internación post quirúrgica necesario para los pacientes. En otras palabras, al planificar la utilización del quirófano, es necesario tener en cuenta todos los procedimientos realizados, ya sea que el paciente requiera internación en un área cerrada o sea un paciente de neonatología. No obstante, en cuanto a la demanda de camas, adoptamos un enfoque distinto. Si una cirugía requiere una cama en terapia intensiva o neonatología para la recuperación postquirúrgica, la clasificamos como una cirugía ambulatoria. Esto se debe a que excluimos las camas de terapia intensiva o neonatología de la capacidad disponible.

Para iniciar el análisis, es esencial tener presente los objetivos que hemos establecido para este estudio. En primer lugar, hemos propuesto una comparación entre la programación quirúrgica manual que se utiliza actualmente y los resultados que arroja nuestro modelo de MIP. Dentro de este análisis comparativo, hemos explorado la posibilidad de reducir la congestión en los días intermedios de la semana, al mismo tiempo que buscamos mejorar la ocupación de camas durante los fines de semana. Además, buscamos entender si al modificar el día de alguno de los bloques del grupo de cirujanos que hoy tiene un día fijo en la semana contribuye a mejorar la utilización de camas. En segundo lugar, buscamos evaluar el impacto económico de nuestra propuesta en la gestión operativa. Detallaremos con mayor profundidad

la metodología que empleamos para abordar este aspecto cuando presentemos el caso de negocio.

Análisis de Resultados

El primer modelo, que consta de 22.411 variables, fue resuelto mediante la API de Python de la versión 22.1.0 de CPLEX desde una computadora de 8 GB de memoria RAM y un procesador Intel i5. La capacidad del modelo para encontrar una solución óptima en un tiempo de ejecución de tan solo 18.87 segundos representa una ventaja significativa para la aplicación y resalta el potencial de esta herramienta. De los 118 bloques en la instancia, el modelo pudo asignar exitosamente 101 bloques quirúrgicos. De acuerdo a la restricción (2), se requiere la asignación de todos los bloques de los grupos *bf* y *ba*. Por lo tanto, la diferencia restante corresponde a bloques del grupo *bs*. De los 35 bloques en el grupo *bs*, el modelo logró asignar 18.

A partir de la asignación de dichos bloques, analizamos la cantidad de cirugías totales llevadas a cabo semanalmente. El modelo de programación propuesto supera en un 7.44% a la cifra de marzo, que representó el mejor desempeño en los tres meses considerados. Además, es importante destacar que este avance se ve respaldado por la ocupación de los quirófanos, que ha alcanzado un 81.56%, en comparación con el 77% de ocupación mediante programación manual en el mismo mes. Esto se traduce en 469 horas de utilización efectiva de un total programable de 575 horas disponibles, tal como se mencionó en la sección de exploración de datos.

Un dato importante a comparar es la distribución de pacientes en el censo de internación por día de la semana. En función de la programación quirúrgica podemos observar que en valores promedios se logra mejorar la ocupación de camas principalmente los días sábados y domingos respecto a la situación actual, mientras que reducimos la misma los días intermedios de la semana. Esto podría generar la inquietud sobre la posibilidad de abastecer esta demanda durante los fines de semana. Es importante señalar que el personal necesario para la atención médica de las 123 camas es fijo, lo que implica que está contemplado, independientemente que se utilicen o no las camas de internación.

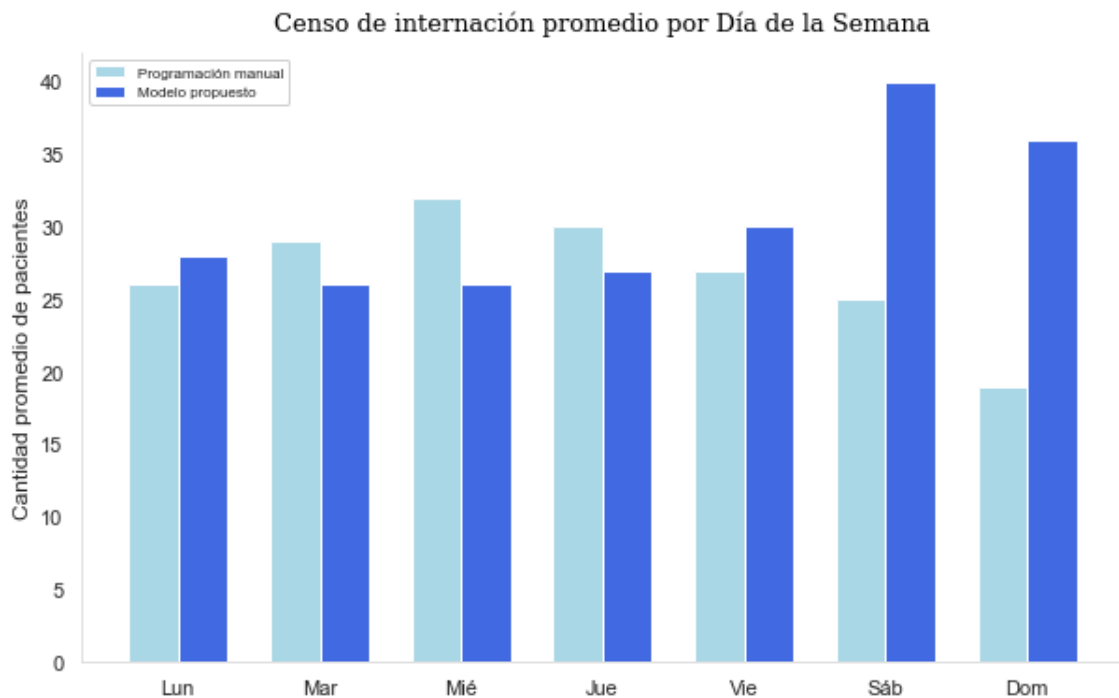


Gráfico 12. Comparativa del censo promedio diario entre el modelo original y nuestra propuesta.

Con el propósito de optimizar la distribución y el uso eficiente de camas de internación, hemos evaluado la posibilidad de realizar ajustes en los días asignados a ciertos bloques quirúrgicos, respetando los acuerdos previos con la institución. En este sentido, dentro de la función objetivo trabajamos en minimizar las modificaciones de los bloques quirúrgicos pertenecientes al conjunto bf pero no incluidos en $bInam$. Estos últimos están vinculados a cirujanos cuyos días de asignación no pueden alterarse, según los acuerdos preestablecidos. Como resultado, el modelo arrojó que se requiere modificar el día correspondiente a 3 bloques quirúrgicos para satisfacer las restricciones. Sin embargo, al analizar la función objetivo vemos que estamos proporcionando el mismo peso a asignar un bloque quirúrgico, específicamente, del conjunto bs ya que según la restricción (2) implica que todos los bloques de los conjuntos bf y ba se asignen, a mover de día un bloque del conjunto $bf \setminus bInam$. Es evidente que asignar un bloque de tiempo a un cirujano que elige realizar exclusivamente sus cirugías en el sanatorio no es equivalente a asignarlo a uno que opera de manera esporádica. Dada esta consideración, la ponderación no está clara. Por lo tanto, para abordar esta incertidumbre, llevaremos a cabo un análisis de sensibilidad con el objetivo de evaluar el impacto de diferentes ponderaciones en la función objetivo.

Realizamos cuatro pruebas con las siguientes funciones objetivos y pesos para α :

$$\max \sum_{i \in B} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} z_{iqtd} - \alpha * \sum_{i \in bf} y_i$$

donde $\alpha \in \{1, 1.5, 2, 8, 12\}$

α	Q bloques con cambio de día	Bloques <i>bs</i> asignados	Censo [L, M, M, J, V, S, D]
1	3	18	[28, 26, 26, 27, 30, 40, 36]
1,5	3	18	[25, 26, 26, 27, 29, 40, 36]
2	2	16	[24, 26, 26, 27, 30, 40, 32]
8	2	16	[24, 26, 26, 27, 30, 40, 32]
12	2	16	[24, 26, 26, 27, 30, 40, 32]

Tabla 1. Resultados del análisis de sensibilidad para distintos pesos α

A continuación se presentan los resultados obtenidos, donde presentamos para cada modelo la cantidad de bloques que sufrieron modificación del día de asignación, la variación en la cantidad de bloques del tercer grupo *bs* asignados, y el censo promedio de internación.

Podemos ver que la cantidad de bloques con cambio de día tiende a 2 conforme aumenta el peso de la variable α . Con lo cual podemos concluir que la ponderación a la que converge es de 2. Sin embargo, con este valor, vemos que se asignan dos bloques quirúrgicos menos, y si miramos el censo de internación podemos ver que en promedio esto representa 8 días cama menos. Para entender el costo económico que representa este cambio, presentamos el siguiente ejercicio:

Considerando un valor de día cama de 500 USD, el cual es un promedio considerado a partir de diversos financiadores e instituciones en la misma región, podemos determinar que el costo asociado a la reubicación de un bloque de un cirujano es:

$$500 [USD/diaCama] * 8 [días Cama] = 4.000 USD \text{ por semana}$$

Al evaluar este ejercicio, hemos llegado a la conclusión de que el costo asociado con reducir de tres a dos la cantidad de movimientos de bloques es elevado. Por lo tanto optamos continuar el análisis fijando $\alpha = 1$, y en el escenario real constatar con dichos cirujanos la posibilidad de realizar dichos cambios. Cuando resaltamos que el bajo tiempo de ejecución es una ventaja para la aplicabilidad de la herramienta, queremos enfatizar que, si después de obtener una programación y discutirlo con el cirujano este no puede realizar el cambio

propuesto, tenemos la flexibilidad de buscar otras soluciones que podrían implicar a diferentes cirujanos.

A pesar de este último aspecto, notamos una desventaja significativa al comparar la salida de nuestro modelo con la programación manual. La comparación no resulta equitativa, ya que, aunque en nuestro modelo utilizamos los datos para simular una cantidad de bloques quirúrgicos para el tercer grupo, estos no coinciden necesariamente con la realidad. Además, es importante señalar que trabajamos con valores promedio, lo cual podría no representar de manera precisa las variaciones individuales en la práctica quirúrgica. Dicho esto, a continuación, en el próximo apartado, evaluaremos otro experimento con el fin de realizar una comparativa justa.

5.2 Modelo de factibilidad

Dado que la estrategia elegida usa los datos para construir la instancia y los bloques quirúrgicos basándose en promedios, y considerando que el tercer grupo de bloques es simulado, consideramos razonable y necesaria verificar la eficacia y adaptabilidad del modelo a la realidad mediante el desarrollo de un nuevo modelo que no utilice promedios. Además, partiendo de la premisa de que disponemos de información sobre la planificación de cirugías con 10 días de antelación, planteamos utilizar los resultados de la primera ejecución pero realizando ciertas modificaciones en el modelo con un enfoque operativo. Nuestra estrategia se centra en implementar un enfoque de *rolling horizon*. Esto implica una ejecución iterativa del modelo semana a semana, permitiéndonos ajustarlo continuamente en función de la información más reciente sobre la planificación de las cirugías, asegurando así una utilización más eficiente de los recursos disponibles y una comparación más ajustada con la realidad. En este nuevo experimento, la principal diferencia radica en el tratamiento del tercer grupo de bloques bs . En lugar de simular bloques a partir de los datos de las cirugías que no tienen un patrón definido de “día/hora/cirujano”, optamos por utilizar los datos de las cirugías reales realizadas por los distintos cirujanos semana a semana y construir bloques a partir de dicha información.

Respecto a los bloques de los conjuntos bf y ba , también realizamos ajustes en la definición de dichos bloques como explicaremos en breve, pero mantuvimos la asignación del quirófano q , el día d , y el inicio t generada en el modelo de valores promedios.

Para llevar a cabo este análisis utilizamos los datos del mes de abril, que es el último mes del conjunto de datos. Construimos cuatro instancias, una para cada semana cuyos detalles explicaremos más abajo, y semana a semana comparamos la solución provista por el

modelo con los resultados derivados de la programación manual, permitiendo así una evaluación más rigurosa y cercana a la realidad.

Un resumen del proceso y metodología utilizada se muestra a continuación en el siguiente flujograma:

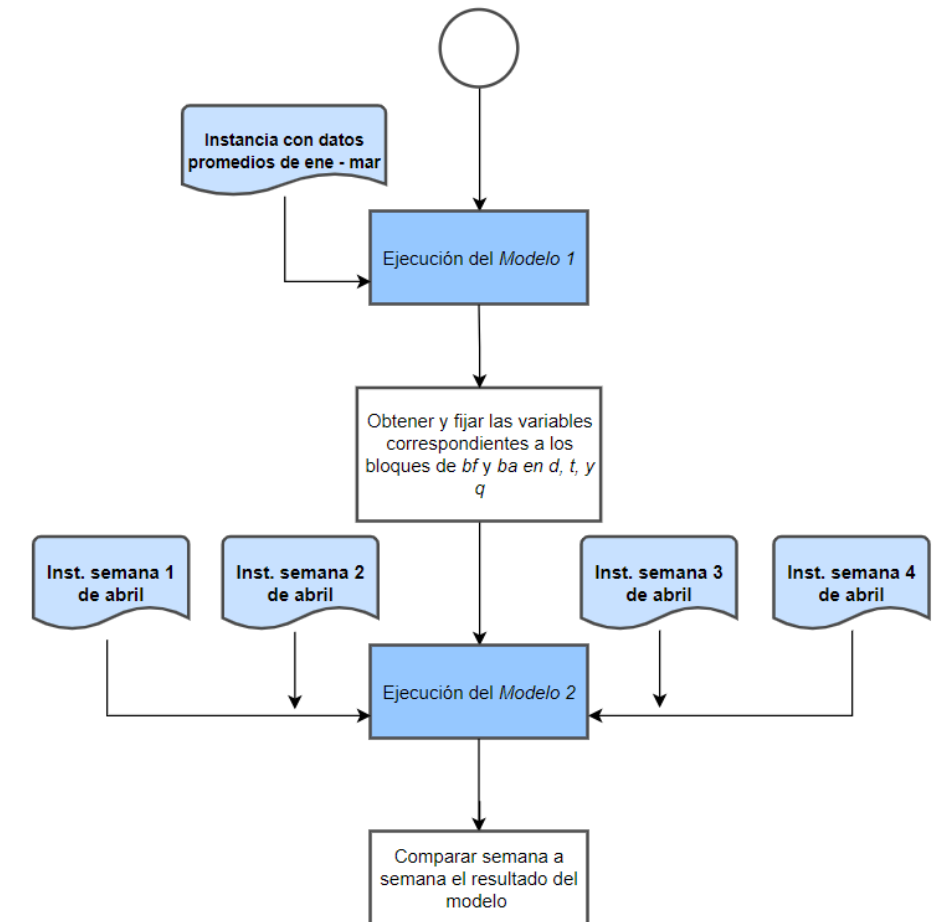


Figura 5. Resumen de la metodología y proceso propuesto

Estas modificaciones introducen nuevas variables al modelo. Por lo tanto, llamamos *bfijos* a la unión de los conjuntos de bloques *bf* y *ba*. Además, para cada uno de estos bloques contamos con información del día en que se asignó $dfijo(i)$, el quirófano donde se asignó $qfijo(i)$, y el slot de inicio donde se asignó $tfijo(i)$, con $i \in bfijos$, obtenidos a partir de la ejecución del Modelo 1

A continuación presentamos las modificaciones y restricciones agregadas respecto al primer modelo:

Modelado - restricciones

$$\max \sum_{i \in B} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} z_{iqtd} \quad (1)$$

$$S.T. \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} z_{iqtd} = 1 \quad \forall i \in b\text{fijos } U \text{ bs} \quad (2)$$

$$\sum_{q \in Q, q=qfijo(i)} \sum_{t \in T, t=tfijo(i)} \sum_{d \in D, d=dfijos(i)} z_{iqtd} = 1 \quad \forall i \in b\text{fijos} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \sum_{d' \in D : d' \leq d} z_{iqtd'} * Dcama_{i(d-d'+1)} \leq Cd \quad \forall d \in D \quad (4)$$

Dado que el modelo original definió el cambio del día de asignación de un número definido de bloques quirúrgicos que se incorporan a este experimento como input, ahora la función objetivo, ecuación (1), maximiza sólo la cantidad de bloques asignados. Mediante la ecuación (2) estamos pidiendo que todos los bloques se asignen. Por otro lado, la ecuación (3) viene a incorporar el resultado del primer experimento. El conjunto de bloques *bfijos* agrupa los bloques de los conjuntos *bf* y *ba*, y para fijar estas variables en el día, quirófano y hora de inicio que arrojó el modelo anterior, agregamos esta restricción en donde la variable toma valor cero en cualquier caso que no corresponda al *qfijo(i)*, *tfijo(i)*, *dfijo(i)* para cada bloque *i*.

Otro cambio significativo radica en que el modelo no cicla semanalmente, como ocurría en el modelo original. Inicialmente, trabajamos con valores promedios de una programación que se repetía semanalmente. Por lo tanto, el modelo tenía en cuenta que si un bloque quirúrgico se asignaba un viernes y tenía un ALOS de 4, ese bloque afectará la ocupación de camas los días lunes. Sin embargo, para este nuevo modelo en donde se ejecuta una instancia individual cada semana este enfoque carece de sentido. La ecuación (4) contempla esta modificación.

A continuación, explicaremos con más detalle cómo construimos las cuatro instancias semanales del experimento para una comprensión más clara del proceso. Como mencionamos anteriormente, creamos instancias independientes que representan a las semanas completas del mes de abril. En primer lugar, ajustamos la duración de los bloques del grupo *bfijo* según la utilización real de cada semana. Por ejemplo, si un bloque tenía una duración programada de 4 horas pero solo se utilizó durante 2 horas en una semana determinada, redefinimos ese bloque con una duración de 2 horas. Si, por el contrario, se utilizó durante 6 horas, mantenemos el bloque original de 4 horas y generamos uno adicional de 2 horas. Estos bloques

adicionales como son de un mismo cirujano no pueden asignarse en el mismo día. En caso de que un cirujano de este grupo no haya realizado cirugías durante esa semana, lo cual sucede con frecuencia por vacaciones o licencias, el espacio queda libre para que el modelo pueda asignar otros bloques. Respecto al tercer grupo *bs*, en lugar de ser bloques simulados como ya dijimos, consideramos el resto de cirugías realizadas en cada una de esas semanas agrupadas por cirujanos. Para cada uno de estos bloques incorporamos la cantidad de cirugías realizadas, la duración en slots y la estancia hospitalaria. Por último, modificamos semana a semana la capacidad de camas disponibles para cada día teniendo en cuenta la demanda generada por la planificación de las cirugías de la semana previa. En el caso particular de la primera semana fue necesario tener en cuenta el desborde generado por la planificación manual de la semana anterior. Los datos de capacidad diaria que se introdujeron en cada instancia para cada semana son:

Semana 1: [12,20,25,26,28,39,39]

Semana 2: [13,22,24,27,29,39,39]

Semana 3: [26,23,23,27,29,40,40]

Semana 4: [23,23,23,26,28,40,40]

La metodología empleada en este experimento se convierte en una herramienta valiosa para los responsables de la programación. Teniendo un conocimiento anticipado y preciso de la demanda y la utilización real de los bloques quirúrgicos con una ventana de tiempo de 10 días, lo cual fue validado con la institución, nuestro modelo no solo optimiza la asignación de recursos, sino que también proporciona una mayor flexibilidad en la planificación, permitiendo adaptaciones eficientes a las necesidades cambiantes y mejorando la eficacia general del proceso de programación quirúrgica.

Este enfoque nos brindó la oportunidad de evaluar la aplicabilidad real de la herramienta, proporcionándonos un marco de comparación apropiado entre nuestro modelo y la programación manual.

Análisis de Resultados

Las cuatro ejecuciones se completaron en tiempos extremadamente cortos, del orden de milisegundos. En todas las corridas, se obtuvieron soluciones óptimas que asignaron todos los bloques con sus respectivas cirugías realizadas durante las cuatro semanas de abril. A partir

de esta asignación logramos obtener la planificación o agenda quirúrgica para cada semana. Como la cantidad de cirugías y utilización de quirófano se mantiene igual, el primer análisis que realizamos fue calcular la utilización de camas requerida por pacientes quirúrgicos y la comparamos con la utilización derivada de la planificación manual en esas mismas semanas. En el siguiente gráfico observamos esta comparación.

Como se ve en el Gráfico 13, esta propuesta demuestra un beneficio al incrementar la utilización de camas los fines de semana a expensas de reducir la misma los días intermedios de la semana. Este resultado es coherente con uno de nuestros objetivos fundamentales. Como fuimos mencionando a lo largo del trabajo, en días intermedios de la semana se generan cuellos de botellas ya que las camas de internación general son requeridas también por pacientes clínicos y obstétricos, y los fines de semana quedan subocupados, por un lado por la programación quirúrgica y por otro porque la solicitud por parte de los financiadores también cae. Entendemos que observar esta contribución quirúrgica de manera aislada no permite ver el impacto de la mejora, es por eso que a continuación presentamos el siguiente caso de negocio donde además incorporamos al análisis el censo de internación global cuyo objetivo es analizar con una perspectiva integral de los recursos.

Comparación de Camas Utilizadas por pacientes quirúrgicos entre Modelo y Programación Manual por Semana

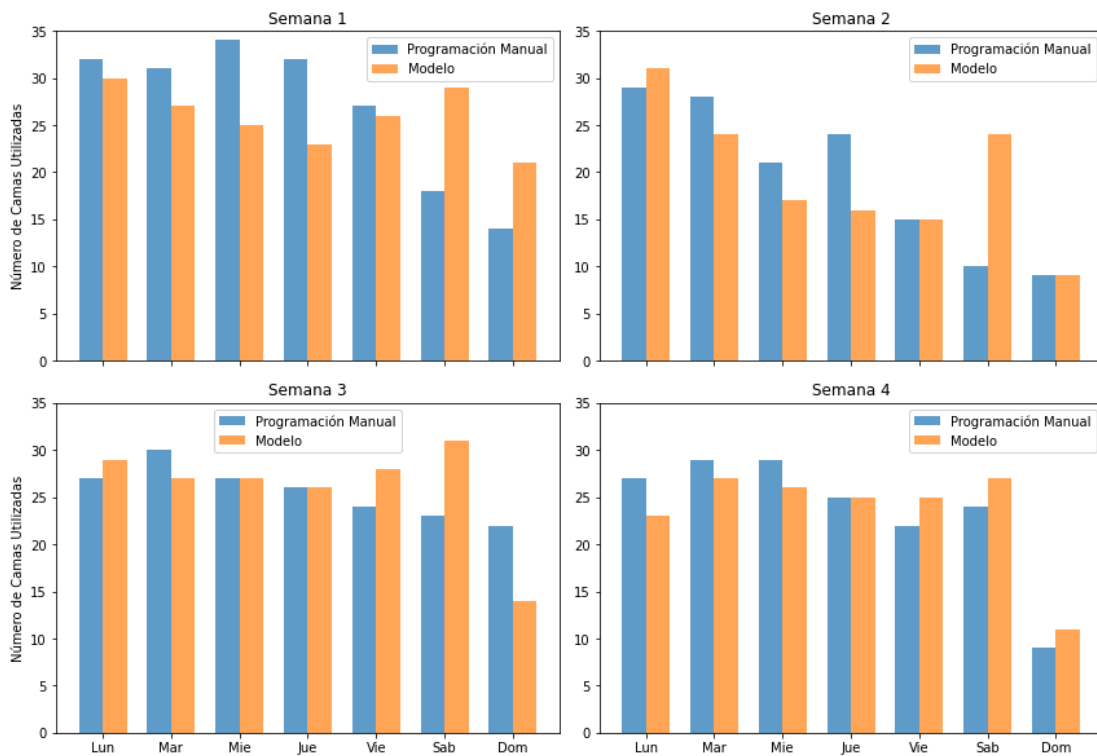


Gráfico 13. Camas demandadas por pacientes quirúrgicos mediante programación manual vs. modelo propuesto

5.3 Caso de negocio

Como hemos destacado a lo largo de este trabajo, nuestro objetivo principal consiste en optimizar la utilización de camas mediante la planificación de cirugías. Es importante recordar que, a diferencia de otras fuentes de demanda que pueden ser aleatorias, la demanda quirúrgica es programada y, por lo tanto, gestionable. En este contexto, nos resulta interesante analizar cuál sería la ventaja de nuestro modelo frente a la situación actual. Para ello el resultado de cada semana lo comparamos con lo que sucedió en ese mes, pero no solo mirando la ocupación de camas por día de la semana sino también evaluando dos aspectos importantes que nuestro modelo podría mejorar. Uno de ellos corresponde a la cantidad de pacientes que podríamos llamar “fuera de lugar”, son aquellos que luego de la intervención quirúrgica pasan la noche en una cama de tipo transitoria a la espera de la cama de destino final. El segundo, son los pacientes rechazados, es decir, la cantidad de pacientes del tipo clínicos que por falta de camas no pudieron ser aceptados. Una mejora en el primer caso, el de pacientes fuera de lugar, corresponde a una mejora y beneficio en la calidad del servicio brindado. El segundo caso es una cuestión que impacta directamente en los resultados económicos, ya que al mejorar la ocupación de camas hacia el fin de semana y bajar la

ocupación los días intermedios podría permitir aceptar más pacientes, utilizar mejor el recurso y mejorar el margen de ganancia, ya que el costo fijo en recurso humano e insumos se sigue generando aún cuando las camas no están totalmente ocupadas.

Para calcular el beneficio económico de la solución consideramos:

- Valor del día cama 500 USD
- Capacidad de camas totales 123

Es importante aclarar que el valor del día cama dado es un valor promedio de los convenios con los distintos financiadores, y a su vez, de distintos sanatorios del mismo área, y corresponde al valor facturado por un día de internación de un paciente en una cama de internación general.

A continuación explicamos la metodología pero antes comentamos la nomenclatura utilizada:

C : capacidad, la cual es fija igual a 123 camas de internación.

O_d : corresponde a la ocupación por día de la semana en los datos reales.

Q_d : cantidad de pacientes quirúrgicos internados por día en los datos reales.

QM_d : cantidad de pacientes quirúrgicos internados por día como resultado de nuestro modelo.

Pf : cantidad de pacientes que quedaron fuera de lugar por día en los datos reales.

Pr : cantidad de pacientes rechazados por día en los datos reales.

En la Tabla 2 que se muestra a continuación puede observarse el detalle por día de estos valores, del lunes 4 de abril al domingo 1 de mayo de 2022.

La segunda línea hace referencia a la capacidad máxima por día, es decir, que en términos facturables la cantidad máxima de días camas vendibles corresponde a 3.444 para los tres tipos de pacientes, quirúrgicos, obstétricos y clínicos. La ocupación O_d corresponde al censo de internación a media noche por contribución de los tres tipos de pacientes. El aporte de pacientes quirúrgicos al censo de internación para cada día está dado por Q_d , es decir, por ejemplo en el primer día de las 123 camas ocupadas, 32 fueron de pacientes quirúrgicos.

Luego, Pf y Pr corresponden a la cantidad de pacientes fuera de lugar y rechazados por día. Hasta aquí, todo lo mencionado corresponde a valores derivados de la programación manual.

Análisis de Resultados																													
Día (d)	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	Totales
Capacidad (C)	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	3444
Datos de la programación manual																													
Ocupación (Od)	123	123	123	123	121	117	109	118	122	123	121	105	92	103	122	123	123	119	121	119	118	123	123	123	123	123	121	109	3313
Pac. qx int. (Qd)	32	31	34	32	27	18	14	29	28	21	24	15	10	9	27	30	27	26	24	23	22	27	29	29	25	22	24	9	668
Fuera de lugar (Pf)	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	12
Rechazos (Pr)	0	1	0	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	12	8	0	0	1	0	1	6	4	1	0	0	0	39
Datos resultado modelo																													
Pac. qx int. (Qmd)	30	27	25	23	26	29	21	31	24	17	16	15	24	9	29	27	27	26	28	31	14	23	27	26	25	25	27	11	663
Ocupación preliminar = Od - Qd + Qmd	121	119	114	114	120	128	116	120	118	119	113	105	106	103	124	120	123	119	125	127	110	119	121	120	123	126	124	111	3308
Fuera de lugar (Pfm)	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	0	2	4	0	0	1	1	0	3	1	0	24
Rechazos (Prm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	8	0	0	1	0	0	4	1	1	0	0	0	24
Ocupación final	121	120	115	120	120	123	116	120	118	120	113	105	106	103	123	123	123	119	123	123	110	121	123	123	123	123	123	111	3311

Tabla 2. Resumen de métricas de las cuatro semanas de abril como resultado de la programación manual y de la solución propuesta.

Al analizar los datos de estas cuatro semanas, una observación inicial importante es que este mes presenta una particularidad que afecta la ocupación hospitalaria. Durante la segunda semana, experimentamos una disminución significativa en la ocupación, atribuible al feriado correspondiente a jueves y viernes Santo. Esta particularidad generó una demanda contenida que se trasladó a la semana siguiente, afectando la distribución típica de la utilización de camas. Es importante destacar que esta situación excepcional influye en la interpretación de los resultados, ya que no refleja un mes estándar.

Siguiendo con el análisis, en primer lugar calculamos, por día, la diferencia entre la ocupación O_d y la cantidad de pacientes quirúrgicos Q_d . De esta manera nos quedamos con el valor de la ocupación de camas dada únicamente por el aporte de pacientes clínicos y obstétricos. Luego, a este resultado le sumamos la cantidad de pacientes quirúrgicos que obtuvimos como resultado del modelo Qm_d . A este valor le llamamos ocupación preliminar.

Aquí se abren dos opciones:

1. Si el resultado es menor que C , utilizamos el remanente de camas con dos propósitos principales. En primer lugar, se emplea para admitir a los pacientes previamente rechazados, y en segundo lugar, se destina a la ubicación de los pacientes que están fuera de lugar.

2. Si el resultado es igual o mayor que C , en este caso, cualquier paciente que esté fuera de lugar o haya sido rechazado nos dejaría en la misma situación que antes.

El primer resultado que obtenemos es que este modelo da un beneficio económico inicial por sobre la programación manual de 5.000 USD por mes. Lo que representa 60.000 USD de facturación adicional al año. Este valor es resultado de sumar a la ocupación preliminar la cantidad de pacientes fuera de lugar vs. los mismos datos de la programación manual.

$$[(3.311 + 24) - (3.313 + 12)] * 500 \text{ USD} = 5.000 \text{ USD}$$

Si observamos la cantidad de rechazos y pacientes fuera de lugar podemos ver que mediante nuestra propuesta bajamos la cantidad de rechazos de 39 a 24 pacientes, es decir 38.46% menos. Esto explica el beneficio inicial, ya que al redistribuir la utilización de camas hacia los fines de semana, se logró aceptar una parte de los pacientes previamente rechazados. Sin embargo, nuestro modelo presenta una desventaja. La cantidad de pacientes fuera de lugar aumenta de 12 a 24, particularmente en un día quedan 5 pacientes en camas transitorias. Si bien estructuralmente no presenta un inconveniente, disminuye la calidad del servicio brindado. Una pregunta que uno se podría hacer es por qué hay overbooking algunos días de la semana. La respuesta a esta pregunta es que nosotros partimos de valores de capacidad de camas para pacientes quirúrgicos como una estimación promedio por día de la semana, pero el modelo desconoce la ocupación global del sanatorio. Esto representa una desventaja y será considerada en el apartado de trabajo a futuro.

Una segunda pregunta que podemos hacernos es, si en nuestra solución permitimos un desborde de hasta 5 pacientes en un día determinado, por qué en la primera semana en los datos reales no se aceptaron 3 de los 4 rechazos que ocurrieron el jueves y llegar al mismo desborde. En primer lugar siempre se busca que no queden pacientes en ese sector pero además, una de las ventajas de la aplicabilidad de esta herramienta es la capacidad para anticipar y gestionar adecuadamente la demanda de camas. Anticiparnos a la demanda diaria y planificar con previsión, permite conocer con anticipación el censo resultante, lo que contribuye a minimizar la cantidad de rechazos.

A continuación en el Gráfico 14 se muestra el resultado y comparación de ambas soluciones en términos de rechazo y pacientes fuera de lugar .

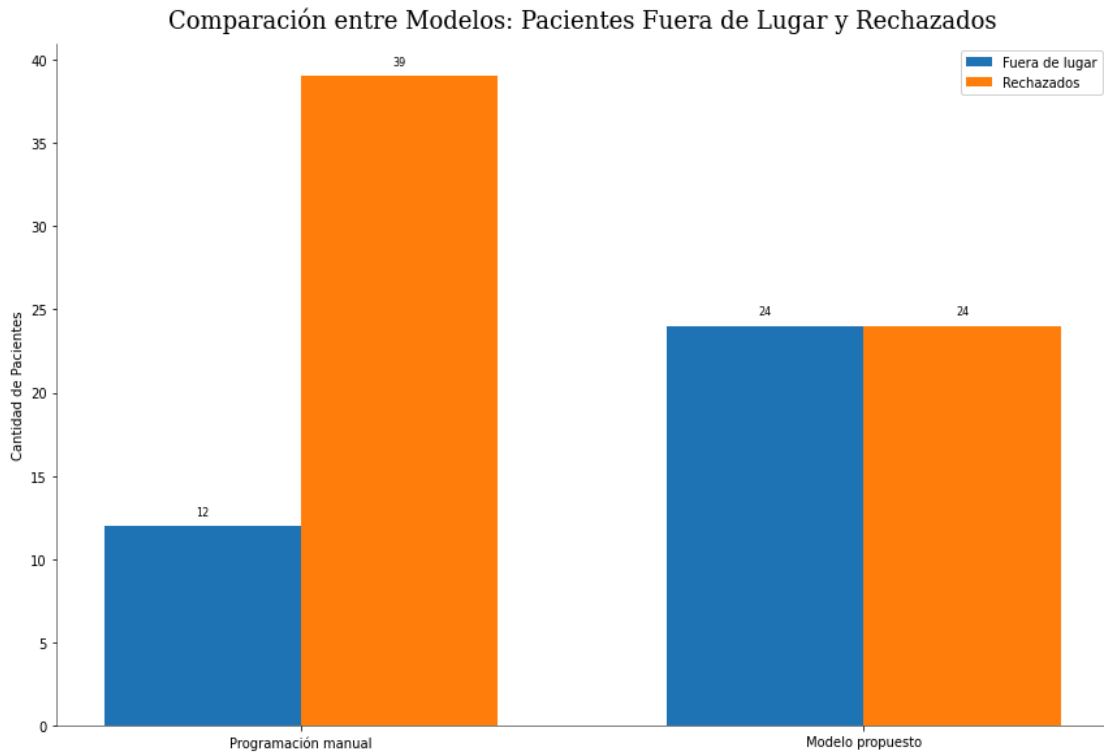


Gráfico 14. Cantidad de pacientes rechazados y en camas transitorias como resultado de la programación quirúrgica manual y nuestra propuesta

Aunque este modelo estresa la ocupación diaria, llegando en días específicos a tener hasta 5 pacientes en camas transitorias, en instituciones de salud donde la capacidad se utiliza constantemente al máximo, mejorar la distribución de la demanda de camas abre oportunidades para aumentar la producción. Esta mejora se refleja al observar y cuantificar las camas disponibles los días martes, miércoles y jueves, donde esta nueva programación ofrece la posibilidad de realizar más cirugías o, alternativamente, proponer activamente a los financiadores opciones para pacientes clínicos.

Si sumamos la diferencia entre la capacidad máxima y la ocupación final de nuestro modelo vs. la capacidad máxima y la ocupación resultado de la programación manual solo los días martes, miércoles y jueves, vemos que hay una oportunidad de facturar 29 días camas más, equivalente a 14.500 USD mensuales, es decir, 174.000 USD al año. Este resultado sumado al beneficio inicial da un beneficio económico final de 224.000 USD al año.

El siguiente gráfico ilustra la redistribución en la utilización de camas de la nueva solución vs. de la solución de la programación manual. En rojo resalta los días viernes, sábados y domingos donde se observa un aumento en la utilización de dichos días.

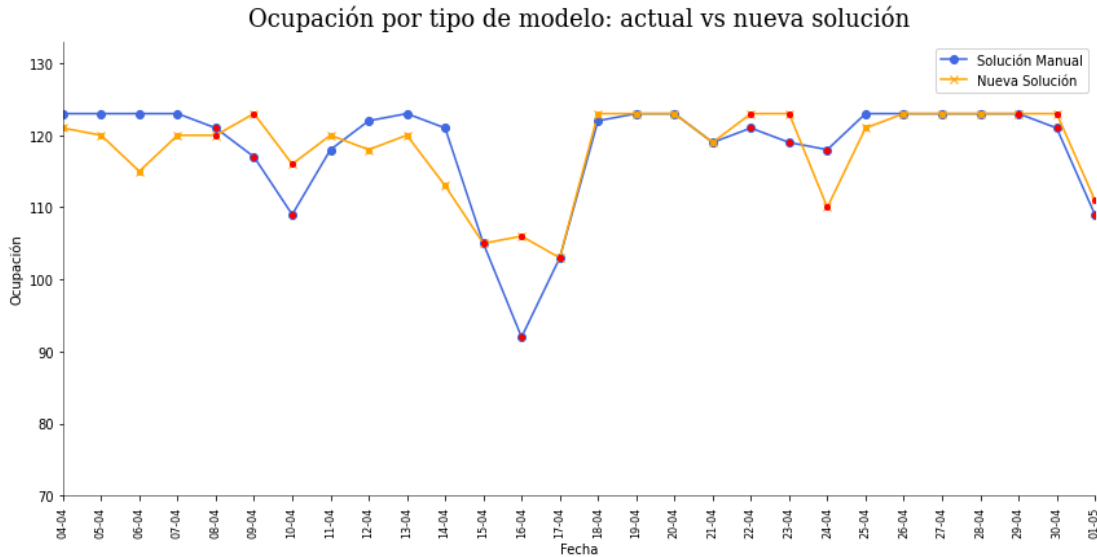


Gráfico 15. Comparativa de la ocupación diaria del 4-04 al 1-05 del modelo original vs la solución propuesta

Por último, al examinar la media y la desviación estándar de la ocupación diaria en cada solución como indicadores de la variabilidad, notamos que, aunque ambas soluciones tienen una media de 118,3 camas, nuestra propuesta demuestra una reducción significativa en la desviación estándar. Mientras que la programación manual resulta en un desvío de 59,26 camas, nuestra solución presenta un valor más bajo de 37,08. Esto puede traducirse en una mejora en la utilización de camas, reducción de tiempos de espera, optimización de recursos y una atención más eficaz a los pacientes. La literatura respalda la idea de que la gestión efectiva de la variabilidad contribuye a una operación hospitalaria más eficiente y mejorada en términos de utilización de camas.

6. Conclusiones y trabajo futuro

La gestión hospitalaria, en particular en Argentina, se encuentra en una encrucijada donde la utilización óptima de los recursos se ha convertido en una tarea imperativa. La necesidad de abordar esta problemática de manera eficiente se vuelve esencial para colaborar en la sostenibilidad y la accesibilidad de los servicios de salud en el país. El persistente aumento de los costos de los servicios, que se ha vuelto un desafío a nivel mundial y se ha visto agravado con la reciente pandemia, plantea la necesidad de una cuidadosa revisión. El desacople entre estos costos y los recursos económicos disponibles se presenta como un aspecto fundamental en la situación actual, resaltando la importancia de optimizar de manera integral los recursos instalados en las instituciones.

En el horizonte de posibles soluciones, se destaca la importancia de incorporar herramientas de Analytics en la gestión hospitalaria. La capacidad de planificar de manera eficiente, respaldada por datos y análisis precisos, emerge como una estrategia clave para optimizar el uso de los recursos disponibles. Dado que la actividad quirúrgica tiene un impacto muy grande en otras áreas, principalmente el área de internación y el uso de dichas camas, una de las formas de ser eficientes y maximizar el uso de estos recursos es el uso de técnicas de la investigación operativa para el armado de la agenda quirúrgica.

En este sentido, en la bibliografía se han propuesto una variedad de modelos con variedad de funciones objetivos y restricciones para abordar esta problemática. Esta variedad de soluciones propuestas se debe a las diferencias sustanciales entre los distintos hospitales públicos y privados en términos de infraestructura, dinámica operativa y estrategia de negocio, y la solución dependerá en gran medida de estas características. Aún así, en la mayoría de las instituciones de Argentina la programación de la agenda quirúrgica se realiza de manera manual, y sin previsión del impacto que genera en el uso de las camas de internación. Por lo tanto, hemos propuesto y evaluado una nueva forma de programación quirúrgica cíclica semanal que no solo considera la estrategia de negocio y las políticas de atención de la institución, sino que también amplía esta perspectiva al tener en cuenta la demanda de camas derivada de dicha programación. A través de esta nueva perspectiva, buscamos incrementar la utilización de camas durante los fines de semana para pacientes quirúrgicos, al mismo tiempo que disminuir su utilización en los días intermedios de la semana. Este enfoque tiene como objetivo generar capacidad para los otros dos tipos de pacientes que compiten por esas mismas camas, clínicos y obstétricos, y para los cuales existe un menor control sobre su demanda.

La solución propuesta se llevó a cabo mediante un modelo MIP que considera cantidades promedio de cirugías por bloque quirúrgico, duración promedio de las mismas y la estancia hospitalaria promedio o ALOS.

Aunque el resultado de esta planificación quirúrgica táctica no permitió una comparación equitativa con la programación manual realizada durante el mismo período de análisis, el primer insight que se obtuvo es que del primer grupo de cirujanos, que ya tenía asignado un bloque quirúrgico en un día específico de la semana, solo fue necesario cambiar el día de tres bloques quirúrgicos. Esto se traduce en una ventaja significativa, ya que estos cirujanos rutinariamente concentraron su actividad quirúrgica en la institución. Además, el corto tiempo de ejecución también presenta beneficios en este contexto, ya que, en caso de no poder realizar estas modificaciones después de discutir las con los cirujanos, se podría evaluar rápidamente otras alternativas de ajuste.

El segundo experimento realizado, experimento de factibilidad, se llevó a cabo para realizar una comparación justa entre el resultado de la programación manual vs. nuestra solución. Además, propone una nueva metodología para la planificación de la agenda quirúrgica. Al tener conocimiento de la utilización real de los bloques, lo que permite liberar tiempo de aquellos subutilizados o de cirujanos con licencia, y al conocer, con 10 días de antelación toda la demanda de procedimientos quirúrgicos de los cirujanos del grupo 3, que agrupa profesionales que operan esporádicamente en el sanatorio, el gestor de la agenda quirúrgica incorpora estos datos al modelo y en cuestión de segundos puede obtener el día en que cada cirujano realizará sus procedimientos. Esta información es sumamente útil para el sector que gestiona las camas de internación y que funciona como una especie de torre de control. Al contar con información precisa de los procedimientos que se llevarán a cabo, los pacientes que demandarán camas de internación y la cantidad de días que permanecerán en el sanatorio, la institución podría mejorar su calidad de atención y facturación.

Al comparar semana a semana los resultados de nuestra solución con los derivados de la programación manual, se observó un aumento de la demanda de camas por pacientes quirúrgicos los fines de semana de un 3,04%, al mismo tiempo que se redujo la misma los días intermedios. Esta disminución permitió la aceptación de 15 pacientes que en la programación manual habían sido inicialmente rechazados, y a esto se le suma la posibilidad de ofrecer 29 días / cama más para utilizar con otros tipos de pacientes. Sin embargo, una potencial desventaja de nuestra solución es que en ciertos días de la semana nuestro modelo tensiona la ocupación de camas, resultando en un desborde o una cantidad de pacientes que

permanecieron en camas transitorias, lo cual supera la cantidad de desborde de la programación manual.

Un punto a tener en cuenta es que los datos analizados muestran una desviación con respecto a un mes estándar, debido a que la segunda semana, afectada por feriados, genera una demanda contenida que se traslada a la tercera semana. Independientemente de esto, nuestro trabajo es el punto de partida para futuras investigaciones y desarrollos, y presenta varias oportunidades de mejora. En este sentido, el primer análisis que planteamos es que nuestro modelo parte de valores promedios estimados de capacidad de camas para pacientes quirúrgicos, y desconocemos el censo o ocupación del resto de las camas. Esto trae, como vimos, la posibilidad de generar circunstancialmente overbooking. Una posible solución a esto podría ser utilizar un modelo predictivo para alimentar al modelo con información de la ocupación de camas de pacientes clínicos y quirúrgicos. De esta manera, al introducir esta información al modelo se puede agregar una restricción de desborde, donde se restrinja el valor máximo permitido de desborde por día. Además, se podría utilizar también un modelo predictivo para predecir la estancia hospitalaria de los pacientes e introducir información más precisa. Cabe mencionar que un experimento que no se llevó a cabo pero que sería interesante realizar y evaluar es liberar el día de asignación de todos los bloques del grupo 1 y que el modelo decida dónde asignar los mismos. Por otro lado, considerando que la reasignación de los tres bloques a otros días podría no ser viable, sugerimos mitigar esta problemática mediante la adición de una restricción. Esta restricción evitaría que los movimientos de los bloques del grupo *bf* se realicen los días sábados. Esta medida busca equilibrar la flexibilidad en la programación con la necesidad de mantener una operación eficiente.

Una segunda propuesta de mejora radica en utilizar técnicas de Revenue Management para gestionar la demanda, y en este sentido se plantea la posibilidad de poder aceptar o rechazar pacientes en base a pautas establecidas por la institución.

Como hemos señalado, este trabajo marca el comienzo de futuras investigaciones. No obstante, hemos llegado a la conclusión de que la utilización de herramientas de Analytics tiene potencial en entornos de servicios de salud complejos y conlleva ventajas significativas. Estas no solo se traducen en beneficios económicos, sino también en mejoras operativas sustanciales. En este sentido, ofrecen una mayor visibilidad y se convierten en herramientas valiosas para los gestores de agendas quirúrgicas, camas de internación y eventualmente otros recursos hospitalarios estratégicos permitiéndoles tomar decisiones fundamentadas con datos.

Referencias bibliográficas

- [1] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y Banco Mundial. (2020). Panorama de la Salud: Latinoamérica y el Caribe 2020. OECD Publishing, París. <https://doi.org/10.1787/740f9640-es>
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS). (2000). The World Health Report 2000. Health systems: improving performance. Geneva, Switzerland: WHO.
- [3] D'Andreamatteo, A., Ianni, L., Lega, F. & Sargiacomo, M. (2015) Lean in healthcare: A comprehensive review. Health Policy. 119 (9), 1197-1209.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (2021) Indicadores de condiciones de vida de los hogares en 31 aglomerados urbanos. Informes técnicos Vol.5,n°200. https://www.indec.gob.ar/uploads/informesdeprensa/eph_indicadores_hogares_11_212835481506.pdf
- [5] Asociación de Clínicas, Sanatorios y Hospitales Privados de la Rep Argentina + Cámara de Entidades de Diagnóstico y Tratamiento Ambulatorio (ADECRA). La crisis de los prestadores médicos privados en Argentina (2021). <https://adecra.s3.amazonaws.com/biblioteca/2021/12/INFORME-ECONOMICO-18-Diciembre-2021.pdf>
- [6] Maceira D., Espínola N. (2017). Garantía de Derechos, Protección Financiera y el Papel de las Agencias de Evaluación de Tecnologías Sanitarias. https://repositorio.cedes.org/bitstream/123456789/4459/1/Doc_t140.pdf
- [7] Litvak, E. & Long, M.C. (2000). Cost and quality under managed care: Irreconcilable differences? The American Journal of Managed Care 6, 305–312.
- [8] Beliën, J. & Demeulemeester, E. (2007). Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. European Journal of Operational Research, 176, 1185-1204.
- [9] Demeester P., De Causmaecker P. & Vanden Berghe G. (2008). Applying a local search algorithm to automatically assign patients to beds. In Proceedings of the 22nd conference on quantitative methods for decision making (Orbel 22), 35–36.
- [10] Bilgin, B., Demeester, P. & Vanden Berghe, G. (2008). A hyperheuristic approach to the patient admission scheduling problem.
- [11] Glass C.A., Knight R.A. The nurse rostering problem: A critical appraisal of the problem structure. (2010) European Journal of Operational Research 202(2), 379–389.
- [12] Dexter, F., Macario, A. & Traub, R.D. (1999). Which algorithm for scheduling add-on elective cases maximizes operating room utilization. Anesthesiology 91, 1491–1500.
- [13] Guinet, A. & Chaabane, S. (2003). Operate theatre planning. International Journal of Production Economics 85, 69-81.
- [14] Jebali, A., Hadj Alouane, A. B. & Ladet, P. (2006). Operating rooms scheduling. International Journal of Production Economics 99, 52-62.

- [15] Noyan Ogulata, S., & Erol, R. (2003). A Hierarchical Multiple Criteria Mathematical Programming Approach for Scheduling General Surgery Operations in Large Hospitals. *Journal of Medical Systems*, 27(3).
- [16] Testi A., Tanfani E., & Torre G. (2007). A three-phase approach for operating theatre schedules. *Health Care Manage Sci.* 10, 163-172.
- [17] Zenteno, A. C., Carnes, T., Levi, R., Daily, B. J., & Dunn, P. F. (2016). Systematic OR Block Allocation at a Large Academic Medical Center. *Annals of Surgery*.