



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



PLANIFICACIÓN DE CIRUGÍAS ELECTIVAS CONSIDERANDO AFINIDAD Y PREFERENCIAS EN EL EQUIPO QUIRÚRGICO

POR

Francisco Alejandro Ríos Fierro

Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía

Carlos Contreras Bolton

Profesor Co-Guía

Guillermo Latorre Núñez

Agosto 2023

Concepción, Chile

© 2023 Francisco Alejandro Ríos Fierro

© 2023 Francisco Alejandro Ríos Fierro. Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, especialmente, a mi familia, quienes me dieron todo lo necesario para llegar hasta aquí; a mi círculo cercano de amistades, ya que el apoyo de ellos fue fundamental para que no decaigan los ánimos en este proceso; a mi polola, que supo ser comprensiva y cariñosa con mis momentos de estrés, ayudando a calmarme en este complejo período; a mi profesor guía, quien supo enseñarme con paciencia y constancia todo lo relacionado con la redacción de este documento; y por supuesto, un cariñoso agradecimiento a Coco, mi perro, ya que mis paseos con él significaron instancias de relajo y desconexión con el mundo de la investigación científica para despejar la mente.

Esta memoria de título fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

RESUMEN

La programación de cirugías es un tema crítico que afecta directamente la cantidad de pacientes atendidos y el uso de los recursos quirúrgicos. En esta memoria de título es abordado el problema de la programación de cirugías electivas incorporando los conceptos de afinidad y preferencias entre los miembros del equipo quirúrgico. La afinidad y las preferencias son conceptos poco estudiados en la literatura, pero que pueden mejorar la coordinación y desempeño del equipo si son consideradas. Así, la afinidad se puede cuantificar como un valor numérico que representa la compatibilidad entre dos miembros del equipo, mientras que las preferencias se refieren al interés de un cirujano por ciertos recursos necesarios para una cirugía. Los enfoques existentes para modelar la afinidad y la preferencia en los modelos de programación matemática han agregado a menudo estos factores como restricciones o términos adicionales a la función objetivo que obliga a trabajar con multiobjetivo. Sin embargo, esto puede conducir a una disminución en el número de cirugías realizadas en pos de mejorar la calidad de la formación del equipo quirúrgico, debido a las limitaciones impuestas por los umbrales mínimos de afinidad o la complejidad de la optimización multiobjetivo.

Para superar estos inconvenientes, se propone un enfoque centrado en maximizar la prioridad de las cirugías programadas, teniendo en cuenta las preferencias y la afinidad entre los miembros del equipo. Se proponen tres versiones de modelos matemáticos: i) sin considerar la afinidad o las preferencias, ii) incorporando estos conceptos como restricciones, y iii) incorporando afinidad y preferencias mediante un enfoque de penalización por puntaje. Además, estas tres versiones son implementadas mediante dos enfoques de programación matemática: programación lineal entera y programación con restricciones. Los resultados muestran que es posible considerar afinidad y preferencias sin perjuicio del número de pacientes asignados. La incorporación de afinidad y preferencias puede conducir a soluciones efectivas y realistas para el problema. En conclusión, considerar la afinidad entre los miembros del equipo es un factor valioso en la programación de las cirugías, ya que puede mejorar la calidad del equipo quirúrgico sin perjudicar el número de cirugías realizadas. Por tanto, se muestra que incorporar componentes de relaciones humanas a las cirugías puede beneficiar el desempeño y el bienestar de los cirujanos.

ABSTRACT

Surgery scheduling is a critical issue that directly affects the number of operated patients and the use of surgical resources. In this work, the elective surgeries scheduling problem is addressed, incorporating the concepts of affinity and preferences among the surgical team's members. Affinity and preferences are concepts little studied in the literature, but they can improve coordination and team performance if they are considered. Thus, affinity can be quantified as a numerical value that represents the compatibility between two team members, while preferences refer to a surgeon's interest in certain resources necessary for surgery. Existing approaches to modeling affinity and preferences in mathematical programming models have often added these factors as constraints or additional terms to the objective function forcing multi-objective work. However, this can lead to a decrease in the number of surgeries performed in order to improve the quality of the surgical teams, due to the limitations imposed by the minimum thresholds of affinity or the complexity of multi-objective optimization.

To overcome these drawbacks, an approach focused on maximizing the priority of scheduled surgeries is proposed, taking into account the preferences and the affinity between team members. Three versions of mathematical models are proposed: i) without considering affinity or preferences, ii) incorporating these concepts as constraints, and iii) incorporating affinity and preferences through a score penalty approach. Furthermore, these three versions are implemented by two mathematical programming approaches: integer linear programming and constraint programming. The results show that it is possible to consider affinity and preferences without prejudice to the number of assigned patients. The incorporation of affinity and preferences can lead to effective and realistic solutions to the problem. In conclusion, considering the affinity between team members is a valuable factor in scheduling surgeries, since it can improve the quality of the surgical team without impairing the number of surgeries performed. Therefore, it is shown that incorporating human relations components into surgeries can benefit the performance and well-being of surgeons.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes generales.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo general.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
2	PROGRAMACIÓN DE CIRUGÍAS ELECTIVAS.....	4
2.1	Marco Teórico.....	4
2.2	Revisión bibliográfica.....	6
3	MODELOS PROPUESTOS.....	11
3.1	Modelos y versiones.....	11
3.2	Supuestos y consideraciones.....	11
3.3	Factores de relación humana.....	12
3.3.1	Considerando la afinidad.....	13
3.3.2	Considerando las preferencias.....	14
3.3.3	Sistema de penalización por puntaje.....	15
3.4	Formulación del modelo de programación lineal entera.....	16
3.4.1	ILP-A.....	21
3.4.2	ILP-B.....	22
3.4.3	ILP-C.....	23
3.5	Formulación del modelo de programación con restricciones.....	23
3.5.1	CP-A.....	28
3.5.2	CP-B.....	28
3.5.3	CP-C.....	29
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Configuración de hardware y software.....	31
4.2	Generación de instancias.....	31
4.3	Resultados de los experimentos.....	34
4.3.1	Experimento A.....	34
4.3.2	Experimento B.....	37
4.3.3	Experimento C.....	40
4.3.4	Comparación del rendimiento.....	45

4.4	Discusión de los factores de relación humana	48
4.4.1	Análisis del modelo de ILP	49
4.4.2	Análisis del modelo de CP	54
5	CONCLUSIONES.....	58
6	GLOSARIO	61
7	REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de la revisión bibliográfica.	10
Tabla 2: Ejemplo de matriz de afinidad.....	13
Tabla 3: Resumen de las cirugías impartidas por quirófano.	33
Tabla 4: Resumen de las instancias.	34
Tabla 5: Resultados de los modelos de ILP-A y de CP-A.	35
Tabla 6: Resultados de los modelos de ILP-B y CP-B con NAP-1.....	38
Tabla 7: Resultados de los modelos de ILP-B y CP-B con NAP-2.....	39
Tabla 8: Resultados de los modelos de ILP-C y CP-C con SPP-40.....	41
Tabla 9: Resultados de los modelos de ILP-C y CP-C con SPP-50.....	42
Tabla 10: Resultados de ejecutar ILP-C y CP-C con 60, 300 y 600 segundos.	45
Tabla 11: Comparación de modelos por <i>gap</i> , RAM y tiempos de resolución.....	47
Tabla 12: Resumen de los promedios de pacientes atendidos - ILP.	49
Tabla 13: Resumen de los promedios de pacientes atendidos (I_1 - I_{16}) - ILP.....	50
Tabla 14: Resumen de promedios y desv. estándar de PRH por cirujano - ILP.	51
Tabla 15: Resumen de promedios y desv. estándar de cirugías por cirujano - ILP.....	52
Tabla 16: Resumen de los promedios de pacientes atendidos - CP.	54
Tabla 17: Resumen de promedios y desv. estándar de PRH por cirujano - CP.....	55
Tabla 18: Resumen de promedios y desv. estándar de cirugías por cirujano – CP.....	56
Tabla 19: Comparación de modelos por promedio de pacientes, PRH y cirugías.	57
Tabla 20: Resumen de los resultados.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Equipo quirúrgico estándar (RNpedia, 2015).	5
Figura 2: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento A.....	36
Figura 3: RAM (GB) utilizada en el experimento A.....	37
Figura 4: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento B – NAP-1.	39
Figura 5: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento B – NAP-2.	39
Figura 6: RAM (GB) utilizada en el experimento B – NAP-1.....	40
Figura 7: RAM (GB) utilizada en el experimento B – NAP-2.....	40
Figura 8: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento C – SPP-40.....	43
Figura 9: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento C – SPP-50.....	43
Figura 10: RAM (GB) utilizada en el experimento C – SPP-40.....	44
Figura 11: RAM (GB) utilizada en el experimento C – SPP-50.....	44
Figura 12: Comparación de <i>gap</i> entre modelos.....	46
Figura 13: Comparación de memoria usada (en GB) entre modelos.	47
Figura 14: Comparación de tiempos de resolución entre modelos.....	48
Figura 15: Comparación de pacientes atendidos – ILP.....	49
Figura 16: Comparación de pacientes atendidos (I_1 - I_{16}) – ILP.	51
Figura 17: Promedio y desv. estándar de PRH por cirujano – ILP.	52
Figura 18: Promedio y desv. estándar de cirugías por cirujano – ILP.....	53
Figura 19: Comparación de pacientes atendidos – CP.....	54
Figura 20: Promedio y desv. estándar de PRH por cirujano – CP.....	55
Figura 21: Promedio y desv. estándar de cirugías por cirujano – CP.....	56

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

La programación de cirugías electivas en hospitales y clínicas es un tema de particular interés dada su importancia en el área de la salud. Idealmente, el hospital debe lograr asignar la mayor cantidad posible de cirugías en un margen de tiempo, mientras se obtiene el máximo provecho de los recursos disponibles tales como cirujanos y quirófanos (Ozkarahan, 2000). Así, el problema de la programación de cirugías electivas puede definirse como la selección de cirugías a realizar, la asignación de recursos a estas cirugías y la secuenciación de los procedimientos dentro del tiempo asignado (May et al., 2010). En definitiva, la programación de cirugías implica la selección, asignación y secuenciación de procedimientos quirúrgicos dentro del tiempo asignado.

Existen múltiples formas de abordar este problema. En la literatura pueden encontrarse métodos heurísticos, métodos de simulación, modelos de programación lineal entera y mixta, modelos de programación con restricciones, modelos estocásticos, entre otros (Rahimi & Gandomi, 2021). Además, existen diversas variantes de las consideraciones del problema. Dependiendo de las necesidades de cada hospital, pueden tenerse en cuenta factores como la prioridad de los pacientes, el equipo quirúrgico a organizar, la disponibilidad de quirófanos o cirujanos, la disponibilidad de recursos para las operaciones, la asignación de enfermeros/as, etc. (Zhu et al., 2019; Abdalkareem et al., 2021).

Año tras año, las investigaciones han tratado de incorporar más condiciones que aportan aspectos más realistas y aplicables a la planificación, según las necesidades de cada hospital. Estas nuevas investigaciones han considerado aspectos como la asignación de cirujanos secundarios y la asignación de camas UCI (Becerra, 2021), la prioridad de los pacientes (Londoño, 2020), la planificación en torno a incertidumbre (Breuer, 2020), etc. Sin embargo, un aspecto poco abordado es la consideración de la afinidad de los cirujanos con el equipo de cirugías y sus preferencias.

La afinidad puede referirse a qué tan bien se sienten los cirujanos con el resto del equipo quirúrgico. Pese a que es un aspecto cualitativo, este concepto puede representarse de forma cuantitativa al considerar un valor numérico en alguna escala, que puede ser obtenido de la apreciación personal de cada miembro del equipo. Así, la afinidad es un valor importante para la realización de una cirugía,

puesto que suelen ser intervenciones largas en tiempo y que requieren una gran compenetración con el equipo. Si el equipo tiene buena relación y se entiende fácilmente, entonces es sensato inferir que la intervención quirúrgica se llevará a cabo de manera más fluida y con menos contratiempos.

De manera similar a la afinidad, el concepto de preferencias alude al interés de los cirujanos principales por poder tener preferencia por algún recurso, tales como un quirófano, un día o una hora específica. Esto puede ser modelado idénticamente a la afinidad, es decir, valorando la preferencia de cada cirujano por cada recurso a través de un número en un intervalo de una escala. Las preferencias comparten cierta similitud con la afinidad, pero puede ser un punto de interés lo suficientemente distinto como para explorarla por separado. Pocos trabajos han utilizado estos conceptos a la fecha de la publicación de este documento. Para esta memoria de título, la afinidad en el equipo quirúrgico y las preferencias del cirujano principal son referidas como factores de relación humana.

Considerar estos factores de relación humana puede tener ventajas al realizar cirugías. Por ejemplo, dado que los cirujanos se enfrentan a condiciones estresantes en una cirugía, cualquier interacción negativa con otros miembros del equipo puede contribuir a aumentar este estrés, perjudicando el desempeño (Driver et al., 1998; Weaver et al, 2010). Por otro lado, si los miembros del equipo tienen una alta afinidad, es más probable que el desarrollo de las cirugías les provoque menos fatiga y cansancio físico, incrementando su satisfacción y bienestar (Parhizi et al, 2013). Asignar recursos a los cirujanos por los que tienen preferencias altas puede tener el mismo efecto anterior. En algunos casos, incorporar estos factores puede incluso influir en el balanceo de las asignaciones, ya que los cirujanos pueden tener predilección por ciertos recursos. Visto así, es sensato asumir que es preferible formar equipos con alta afinidad y respetando las preferencias de los cirujanos de ser posible.

Adicionalmente, estos factores de relación humana ayudan a superar otros inconvenientes que se presentan en la planificación de las cirugías, como el favoritismo de los planificadores por determinados cirujanos. Este fenómeno consiste en que el encargado de la toma de decisiones asigne mejores equipos y/o recursos a determinados cirujanos, motivados generalmente por su favoritismo histórico por los cirujanos antiguos por sobre los nuevos. Por otro lado, utilizar modelos matemáticos para resolver este problema tiene el potencial de asegurar asignaciones justas y equitativas.

Por todo lo anterior, en esta memoria de título se exploran alternativas para implementar estos conceptos en la planificación de cirugías, de forma que se cumpla con las condiciones de afinidad y preferencias. Así, el objetivo es obtener resultados coherentes y sin perjudicar la cantidad de

operaciones que se pueden llegar a realizar en el día a día, construyendo sobre el modelo de afinidad propuesto por Becerra (2021) en el que se busca maximizar los niveles de afinidad entre todo el equipo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Implementar un modelo de programación lineal entera y un modelo de programación con restricciones para la programación de cirugías electivas en un hospital considerando los aspectos de afinidad y preferencias del equipo quirúrgico.

1.2.2 Objetivos específicos

- I) Realizar una revisión de la literatura de los problemas de programación de cirugías electivas considerando afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico.
- II) Proponer un modelo de programación lineal entera para el problema de programación de cirugías electivas considerando afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico.
- III) Proponer un modelo de programación con restricciones para el problema de la programación de cirugías electivas considerando afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico.
- IV) Generar instancias para el problema a partir de datos reales obtenidos por un hospital de Chile.
- V) Comparar los modelos propuestos en términos de rendimiento, cantidad de cirugías y calidad de los equipos quirúrgicos formados.
- VI) Analizar el impacto de la afinidad y las preferencias en los resultados obtenidos.

2 PROGRAMACIÓN DE CIRUGÍAS ELECTIVAS

2.1 Marco Teórico

Dentro del área de la salud hay múltiples conceptos que son importantes para el entendimiento de este trabajo. Por ejemplo, las cirugías son clasificadas en dos tipos: electivas y no electivas. Las cirugías electivas corresponden a aquellas cirugías que no son urgentes, es decir, puede pasar un periodo de tiempo razonable en el que el paciente no se verá afectado por no ser operado. Esto implica que la fecha de su operación puede ser escogida con cierta holgura, y puede estar sujeta a la disponibilidad de cirujanos u otros recursos. Por otro lado, las cirugías no electivas corresponden a cirugías de carácter urgente, las cuales no pueden estar sujetas a una holgura de la magnitud de las cirugías electivas y que deben ser asignadas lo más pronto posible. Cada tipo de cirugía suele tener su propia manera de ser abordada según cada hospital, ya sea incluyéndolas en la planificación de cirugías electivas con el objetivo de minimizar la alteración del cronograma, o asignándoles quirófanos de emergencia exclusivos (Roland et al., 2006). En este trabajo se consideran solo cirugías electivas.

Las cirugías son realizadas por un equipo quirúrgico, que está compuesto por varias personas. Destaca, en primer lugar, el cirujano principal quien es el encargado de llevar a cabo la mayoría de la operación. Usualmente es acompañado por un cirujano secundario, quien puede tomar el mando de la operación en caso de que lo requiera el cirujano principal (Teunissen, 2020). Dependiendo de la cirugía, pueden requerirse otros integrantes para el equipo quirúrgico, tales como enfermeros(as) y/o anestesiastas. La Figura 1 muestra un equipo quirúrgico estándar para una operación, en donde aparecen tanto recursos humanos como maquinaria. Para el caso de este trabajo, se considera en el equipo quirúrgico a un/a cirujano/a principal, un/a cirujano/a secundario, un/a enfermero/a y un/a anestesiasta por operación.



Figura 1: Equipo quirúrgico estándar (RNpedia, 2015).

La prioridad de un paciente se refiere a la importancia relativa de su condición médica en comparación con otros pacientes. Esta clasificación permite que se asignen los recursos limitados de manera efectiva y justa. La prioridad se determina generalmente mediante la evaluación de la gravedad de la enfermedad o lesión del paciente, su nivel de dolor o sufrimiento, la probabilidad de recuperación y la urgencia de tratamiento. En situaciones de emergencia, la prioridad se determina de acuerdo con la necesidad de atención médica inmediata y la gravedad de la condición del paciente. Se han hecho estudios en varios países para determinar bajo qué criterios se debería determinar la prioridad de cada paciente (Hadorn & Holmes, 1997). En este trabajo, la prioridad está determinada por el tiempo que han estado los pacientes en la lista de espera y su edad.

Las cirugías son asignadas a un quirófano en un día y bloque específicos. El quirófano es la sala de operaciones en donde se realiza la cirugía, y se requiere que este quirófano contenga las condiciones necesarias para que pueda efectuarse. Los bloques son segmentos de tiempo en un día en los cuales es posible asignar una cirugía. Pueden existir operaciones que requieren más de un bloque para realizarse. En esta memoria de título, se consideran cuatro quirófanos disponibles y ocho bloques de una hora por día.

2.2 Revisión bibliográfica

Los problemas de asignación de cirugías para servicios de la salud han sido estudiados desde diferentes puntos de vista. Al tratarse de un problema universal, muchos países alrededor del mundo requieren encontrar una solución para optimizar los procesos de sus sistemas de salud. Como muchos estudios han demostrado, los quirófanos corresponden a uno de los costos focales más importantes del ámbito hospitalario. Esto motiva a los administradores a cargo de los quirófanos a mejorar la planificación y asignación de recursos quirúrgicos (Zhu et al., 2019). Muchas entidades participan en la planificación de una cirugía, siendo los más importantes los administradores del quirófano, los cirujanos y los mismos pacientes (Cardoen et al., 2010; May et al., 2011).

Este problema puede ser modelado mediante el uso de técnicas de optimización, en donde conjuntos particulares de objetivos y restricciones son considerados para cada caso. Sin embargo, el problema modelado puede llegar a ser sumamente difícil de resolver y puede llegar incluso a presentar un obstáculo en la administración del hospital si no se trata de manera adecuada (Zhu et al., 2019).

Existe una extensa cantidad de trabajos que abordan el problema de la asignación de cirugías electivas. A continuación, se presenta una revisión bibliográfica enfocada solo en los trabajos que consideran los factores de interés para esta memoria de título. Estos factores son el tipo de paciente considerado, el tipo de función objetivo usado, el método de solución para el problema y la consideración de los factores de relación humana.

Meskens et al. (2013) introduce el concepto de afinidad del equipo quirúrgico a la programación de cirugías. Los autores presentan un modelo de programación con restricciones que incluye restricciones basadas en la vida real tales como la disponibilidad y la afinidad en el equipo quirúrgico. El objetivo de su investigación es optimizar el uso de los quirófanos al reducir al mínimo el *makespan*, minimizando las horas de sobretiempo y maximizando las afinidades de los integrantes de cada equipo. Mientras, el objetivo de esta memoria de título es maximizar la prioridad de los pacientes y maximizar la afinidad y las preferencias en el equipo.

Dios et al. (2015) construyen un sistema previo a la ejecución de un modelo de programación lineal entera, que filtra a las enfermeras en función de su afinidad y otros conceptos. Este sistema es capaz de producir un plan de hasta seis meses que estima la semana en la que cada paciente debería ser intervenido. De esta manera, los materiales y recursos humanos necesarios para su operación pueden

ser organizados con tiempo. Para esta memoria de título, este trabajo es relevante por su consideración de la afinidad en el equipo de enfermeros/as, pero esta consideración es usada en un proceso previo al modelamiento y, por lo tanto, no forma parte ni de las restricciones ni de la función objetivo del modelo implementado.

Latorre-Núñez et al. (2016) abordan el problema de asignación de cirugías considerando los quirófanos, la recuperación post-anestesia, los recursos requeridos para la cirugía y la llegada inesperada de cirugías de emergencia (es decir, de pacientes no electivos), simultáneamente. Proponen un modelo de programación lineal entera y uno de programación con restricciones, que usan para encontrar soluciones para instancias pequeñas. Además, proponen una metaheurística basada en un algoritmo genético y una heurística constructiva para resolver instancias más grandes.

Di Martinelly & Meskens (2017) proponen un enfoque multiobjetivo para la asignación de enfermeros y enfermeras a turnos de trabajo considerando aspectos clásicos como los aspectos legales y el calendario de cirugías. Pero, adicionalmente, al construir los calendarios semanales de los enfermeros/as se asignan a cirugías de tal forma que se maximice la afinidad del equipo quirúrgico y a la vez se minimice el tiempo muerto de dichos recursos humanos.

Hamid et al. (2019) desarrollan un modelo multiobjetivo para la programación de cirugías. Consideran dos objetivos; el primer objetivo incorpora los estilos de toma de decisiones de los miembros del equipo quirúrgico con el fin de mejorar los niveles de compatibilidad (un concepto similar a la afinidad). Mientras, el segundo otorga una solución más efectiva y realista al problema considerando varios factores prácticos como la disponibilidad de recursos, prioridad de los pacientes, entre otros. Para esto, implementan un modelo de programación lineal entera multiobjetivo y dos metaheurísticas. Comparan sus resultados con la planificación manual de un hospital, obteniendo una mejor planificación.

Breuer et al. (2020) implementan un modelo de optimización robusta que combina decisiones de asignación de personal y calendarización con el objetivo de minimizar el impacto de la variación en la duración de la cirugía, disponibilidad de personal y llegadas de urgencia. Proponen un modelo que tiene como objetivo maximizar el número de pacientes asignados y maximizar las preferencias de horario del personal médico, entre otras cosas. Este modelo utiliza una función de un solo objetivo que considera varios factores mediante el uso de pesos, entre los cuales se encuentra la consideración de preferencias. Esto es similar al enfoque usado en esta memoria de título. Sus resultados muestran

un aumento en el nivel de preferencias del equipo, en conjunto con un incremento de nivel de servicio y porcentaje de utilización.

Ahmed & Ali (2020) consideran la preferencia de los pacientes por cirujanos al problema de la asignación de cirugías. Para modelar esta preferencia se basan en nueve criterios, entre los cuales se encuentran la reputación, habilidades comunicativas, edad y género. Consideran pacientes electivos que quieren realizarse una cirugía plástica, e implementan un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo. Sus resultados muestran que más del 70% de los pacientes son asignados a su cirujano preferido, y menos del 5% son asignados a su cirujano menos preferido. Concluyen que los costos de implementar este modelo son similares a los costos por no implementarlo.

Barrera et al. (2020) desarrollan un modelo de programación dinámica estocástica para resolver el problema de la asignación de cirugías en el contexto hospitalario chileno. Toman como factor distintivo la consideración de los pacientes con patologías GES (conjunto de patologías consideradas en las Garantías Explícitas de la Salud), y su objetivo es minimizar el costo por transferencias de pacientes desde el sector público al sector privado. Además, implementan una heurística para obtener buenos resultados en bajo tiempo, ya que los hospitales requieren que la toma de decisiones sea rápida y ágil. No consideran factores de relación humana, pero este trabajo es relevante para esta memoria de título debido a que utiliza datos propios del contexto de Chile.

Park et al. (2021) se enfocan en el problema de asignación de quirófanos tomando en cuenta las preferencias de quirófanos y bloques horarios de los cirujanos. Además, consideran operaciones cooperativas, que son operaciones donde varios cirujanos participan en la cirugía del paciente. Así, proponen un modelo de programación lineal entera y un algoritmo que busca minimizar el número de quirófanos utilizados y el sobretiempo, mientras que, al mismo tiempo, obtenga un resultado satisfactorio respecto a las preferencias de los cirujanos. El algoritmo propuesto entrega mejores soluciones que el modelo de programación entera, y se ven mejoras sustanciales al comparar con la planificación manual del hospital con el que trabajan.

Becerra (2021) propone el concepto de afinidad entre un cirujano primario y uno secundario en un modelo de programación lineal entera. Este trabajo propone la afinidad entre ambos cirujanos como una restricción, implicando que es un requerimiento estricto que ambos tengan un nivel aceptable de afinidad para poder realizar una operación. Con el objetivo de maximizar la prioridad de los pacientes electivos, se propone un modelo de programación lineal entera y un algoritmo genético.

Bargetto et al. (2023) abordan el problema de la planificación de cirugías y quirófanos que incluyen restricciones comunes en la práctica, como secuencias, capacidades y fechas límite. Además, consideran restricciones para recursos humanos como enfermeros/as. Desarrollan un nuevo modelo que considera tiempos de limpieza de quirófanos dependientes de secuencias, que consiste en un algoritmo de *Branch-and-price-and-cut*. Sus resultados muestran que este algoritmo supera a otros algoritmos de la literatura e incluso a *solvers* comerciales como CPLEX.

En resumen, en la Tabla 1 son presentados los principales estudios de la literatura, en orden cronológico, que se relacionan con el problema abordado en este trabajo y que son resumidos en esta sección. Cabe destacar que el símbolo “✓” significa que el trabajo referido presenta el tema de la columna. A continuación, se presenta el detalle de cada columna:

- **Tipo de paciente:** se refiere al tipo de paciente que toma en consideración el trabajo, los cuales pueden ser de tipo electivo (E) o no electivo (NE).
- **Función objetivo:** se refiere al tipo de función objetivo del modelo presentado. Pueden ser funciones de un único objetivo (FO) o funciones de tipo multiobjetivo (FM).
- **Método de resolución:** se refiere al método usado para solucionar el problema abordado: ILP en caso de ser un modelo de programación lineal entera, CP si corresponde a un modelo de programación con restricciones, y en caso de cualquier otro método, se usa Otro.
- **Factores de RH:** se refiere a la consideración de los factores de relación humana (RH), que son la afinidad (A), las preferencias (P) y conceptos similares en la programación de cirugías.

Notar que en la Tabla 1 se puede ver que los factores de relación humana han sido poco utilizados en la literatura. De hecho, Abdalkareem et al. (2020), uno de los últimos trabajos de revisión de la literatura, estudiaron 190 artículos del tema en la última década, donde solo siete trabajos (3,7%) consideran la afinidad, las preferencias o alguna de sus variantes.

Tabla 1: Resumen de la revisión bibliográfica.

Autores	Año	Tipo de Paciente		Función objetivo		Método de Solución			Factores de RH	
		E	NE	FO	FM	ILP	CP	Otro	A	P
Meskens et. al	2013	✓		✓			✓		✓	
Dios et al.	2015	✓		✓		✓		✓		
Latorre-Núñez et al.	2016	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
Di Martinelly & Meskens	2017	✓			✓	✓			✓	
Hamid et al.	2019	✓			✓	✓		✓	✓	
Roshanaei et al.	2020	✓		✓		✓	✓			
Breuer et al.	2020	✓	✓	✓				✓		✓
Ahmed & Ali	2020	✓			✓			✓		✓
Barrera et al.	2020		✓	✓				✓		
Park et al.	2021	✓		✓		✓		✓		✓
Becerra	2021	✓		✓		✓		✓	✓	
Bargetto et al.	2023	✓			✓			✓		
Ríos	2023	✓		✓		✓	✓		✓	✓

3 MODELOS PROPUESTOS

3.1 Modelos y versiones

Con el fin de encontrar los mejores resultados posibles para el problema de la asignación de cirugías considerando afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico, son considerados dos enfoques. El primer enfoque considera un modelo de programación lineal entera (ILP, por sus siglas en inglés: *Integer Linear Programming*) y el segundo enfoque considera un modelo de programación con restricciones (CP, por sus siglas en inglés: *Constraint Programming*). Cada modelo considera tres versiones, las cuales son:

A: Esta versión corresponde a un modelamiento simple del problema de la asignación de cirugías, sin considerar ni la afinidad en el equipo quirúrgico ni las preferencias del cirujano principal en cuanto a recursos. Esta versión sirve para medir el impacto de considerar estos conceptos en la resolución del problema original.

B: Esta versión incorpora los conceptos de afinidad y preferencias al problema original, donde los equipos quirúrgicos solo pueden ser formados si se cumple con un requisito mínimo y arbitrario de afinidad en el equipo. Además, considera que los recursos pueden ser asignados si la preferencia del cirujano principal es lo suficientemente aceptable. Dado que esta versión modela estos conceptos como restricciones, pueden darse situaciones en las que algunas cirugías podrían no realizarse, si no se cumplen los valores mínimos de preferencias y afinidad.

C: Esta versión corresponde al modelo definitivo del problema original, donde los conceptos de afinidad y preferencias también son incorporados. A diferencia de la versión B, estos conceptos no son restrictivos para la asignación de cirugías, si no que representan una mejora o un deterioro para los valores que puede tomar la función objetivo. Esta versión tiene como prioridad asignar cirugías, y en segundo lugar, mejorar las condiciones de afinidad y preferencias en el equipo.

3.2 Supuestos y consideraciones

Los supuestos y consideraciones a tener en cuenta en la implementación de los modelos son:

1. Todos los datos necesarios (tales como el tipo de cirugía requerida por el paciente o el tiempo aproximado de su duración) para los modelos se conocen con antelación y están disponibles para que sean utilizados por el responsable de la toma de decisiones respecto a la asignación de cirugías.
2. Todos los pacientes son pacientes electivos.
3. Cada quirófano, según el bloque horario, está preparado para atender a pacientes con un tipo de cirugía requerida específica. Pacientes cuya necesidad quirúrgica no sea igual a la que ofrece el quirófano no pueden ser atendidos en este quirófano en dicho bloque horario.
4. Para cada quirófano y bloque horario, es asignado un equipo de enfermeros/as, anestesistas y/o cualquier otro miembro clave en la realización de una cirugía. Esto implica que la disponibilidad de estos especialistas siempre está asegurada para cualquier cirugía.
5. Los quirófanos funcionan durante una cantidad definida de horas durante el horizonte de planificación. Esta cantidad de horas puede variar en función del día.
6. Una vez que comienza una cirugía no puede ser interrumpida.
7. Cada cirugía requiere a un cirujano primario y a un cirujano secundario, puesto que la mayoría de las intervenciones requieren a un cirujano líder y a un cirujano asistente.
8. Es un requisito necesario que la especialidad del cirujano primario sea la misma que la necesaria para el paciente, pero el cirujano secundario puede tener cualquier especialidad.
9. El horizonte de planificación considerado es de cinco días. No es recomendable considerar horizontes más largos debido a la variabilidad del sistema.
10. El tiempo está discretizado en intervalos de 60 minutos.
11. Se asume que las cirugías no sufren atrasos.
12. El tiempo de preparación del quirófano y de limpieza después de la cirugía está considerado dentro de la duración total de la cirugía.
13. La duración de las cirugías está contabilizada por cantidad de bloques horarios en vez de horas y minutos.

3.3 Factores de relación humana

En esta sección se presentan los conceptos de relación humana que se agregan al problema de programación de cirugías propuesto en esta memoria de título.

3.3.1 Considerando la afinidad

Se establece una matriz de afinidad para equipos quirúrgicos, en donde los cirujanos principales indican su afinidad con el resto del equipo mediante la escala de Likert (Likert, 1932). La escala de Likert valora el grado de desacuerdo o acuerdo de un entrevistado sobre una aseveración (que en este caso corresponde a que siente un gran nivel de afinidad con otra persona). Es importante notar que este componente es muy subjetivo, ya que un cirujano podría escoger evaluar con una nota muy alta o muy baja a alguno de sus colegas mediante esta escala. Si bien se espera que esto pueda permitir formar equipos con más afinidad que otros, esto no debería ser en perjuicio de la cantidad de cirugías a realizarse.

La escala de Likert evalúa el grado de acuerdo de un encuestado con una aseveración mediante un gradiente. Generalmente, esto se hace mediante cinco niveles, que son: i) muy en desacuerdo, ii) en desacuerdo, iii) ni de acuerdo ni en desacuerdo, iv) de acuerdo y v) muy de acuerdo. Para este trabajo, cada uno de estos niveles es representado mediante un número entre 0 y 4.

Las afinidades se expresan mediante una matriz cuadrada, en donde cada fila y cada columna representan un cirujano y otro miembro del equipo, respectivamente. Luego, para cada pareja cirujano-integrante, se asigna un puntaje que va de 0 a 4 siguiendo la estructura de Likert y de acuerdo a la afinidad declarada por el cirujano principal. Una afinidad completa es representada por un puntaje de 4, mientras que la incompatibilidad absoluta es representada por un puntaje de 0 (Meskens et al., 2013).

Tabla 2: Ejemplo de matriz de afinidad.

Principal/Secundario	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4
ID 1	3	1	1	0
ID 2	2	3	0	4
ID 3	2	3	1	1
ID 4	1	0	2	1

En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de una matriz de afinidad entre cuatro cirujanos principales y cuatro cirujanos secundarios. En este caso, el cirujano principal 1 evalúa con un puntaje de tres su compatibilidad con el cirujano secundario 1, mientras que este mismo cirujano principal evalúa con

un puntaje de cero al cirujano secundario 4. De esta manera, se aplica lo mismo para los demás cirujanos.

Este enfoque se basa en la matriz de afinidad de Meskens et al. (2013), que presenta tres consideraciones principales para su funcionamiento efectivo:

- Es necesario verificar que ningún cirujano establezca sus afinidades de tal forma que la suma de todos los puntajes sea cercana a cero.
- Es necesario verificar que ningún cirujano sea valorado con puntajes muy bajos por todos sus demás colegas.
- La forma de valoración no debería diferir demasiado entre los cirujanos. Por ejemplo, debería impedirse que el promedio de valoración de un cirujano sea 1 y el promedio de valoración de otro sea 4.

Este puntaje de afinidad puede ser incorporado como un término en la función objetivo o tratado como limitante en una serie de restricciones. Mientras que en Meskens et. al (2013) es considerado parte de una serie de restricciones, en este trabajo es utilizado de ambas formas. Además, en lugar de que simplemente se recompense el organizar equipos con altos niveles de afinidad, se implementa un sistema de penalización. Este sistema es explicado más adelante.

3.3.2 Considerando las preferencias

De forma similar a la matriz de afinidad descrita en la sección anterior, se propone una matriz de preferencias para representar cuáles son los recursos más valorados por cada cirujano principal. En lugar de asignar un puntaje (entre 0 y 4) para representar la afinidad entre dos miembros del equipo, el puntaje propuesto representa cuánto valora el cirujano cada recurso de ser asignado a él o ella.

En este trabajo, los recursos considerados son el día, bloque horario y quirófano en que se realiza la cirugía. Sin embargo, dependiendo de las necesidades de cada hospital, cualquier número de recursos puede ser añadido siempre y cuando se establezca una matriz de preferencias para ellos. Este puntaje, tal como el puntaje por afinidad, se incorpora en el sistema de penalización por puntaje, descrito en la siguiente sección.

3.3.3 Sistema de penalización por puntaje

Los respectivos puntajes de afinidad y preferencias son incorporados a la función objetivo a través de un sistema de penalización por puntaje (SPP) para dar importancia a la afinidad entre los miembros del equipo y la preferencia de recursos del cirujano principal.

El sistema funciona de la siguiente manera: cada día, cada cirujano obtiene una cierta cantidad de puntaje total para "invertir". Cuando un cirujano secundario y otros miembros del equipo son asignados a una cirugía con un cirujano principal, se calcula un costo de afinidad total (CAT) sumando cada puntaje de afinidad entre el cirujano y los miembros del equipo. Luego, este CAT es deducido de la puntuación total del cirujano. Esta puntuación total nunca puede ser inferior a 0, y la puntuación total inicial debe determinarse mediante experimentación, la cual debe depender del número de cirujanos del hospital y la cantidad de otros recursos relevantes para la realización de las cirugías.

Lo mismo aplica cuando se asigna un conjunto de recursos a un cirujano principal. Para este trabajo, corresponden al día, bloque y quirófano. Las puntuaciones de preferencia de cada uno de estos recursos representan un costo total de preferencias (CPT), que se deducen de la misma puntuación total del cirujano, y nunca puede ser inferior a 0. La suma del CAT y del CPT determinan el puntaje de relación humana (PRH).

Si bien el objetivo de la función objetivo es maximizar la cantidad de cirugías asignadas y la priorización de pacientes, el SPP es restado del valor total de la función objetivo. Así, el cuánto se resta depende de la puntuación total que tiene cada cirujano al final del horizonte de planificación. Por ejemplo, si a cada cirujano le queda una puntuación total restante de 10, la función objetivo se reduce en 10 por cada cirujano.

Cabe señalar que asignar una cirugía es α veces más valioso que reducir el valor otorgado por el SPP. De esta forma, la prioridad del modelo es maximizar la cantidad de cirugías, y luego trata de mejorar la relación humana del equipo, minimizando la penalización. Así, solo se podría postergar la operación de un paciente si esto implica mejorar la relación entre el equipo quirúrgico de forma realmente significativa.

Adicionalmente, el SPP considera que los puntajes no utilizados en los primeros días del horizonte de planificación tienen un mayor impacto en la función objetivo. Por tanto, el modelo busca asignar la mayor cantidad de cirujanos posibles para que sus puntajes sin invertir sean bajos. Este efecto busca

que las cirugías se realicen de manera más balanceada entre los cirujanos, y así, impedir que algunos cirujanos queden sobrecargados de cirugías.

3.4 Formulación del modelo de programación lineal entera

A continuación, se presenta el modelo de ILP que está basado en el modelo de Becerra (2021). A continuación, se presentan las principales diferencias del modelo propuesto respecto al modelo de Becerra (2021):

1. No se considera la disponibilidad de camas UCI.
2. No se considera la disponibilidad de enfermeras u otros profesionales auxiliares en las cirugías. En cambio, se asume que son asignados a turnos fijos dependiendo del día y bloque horario.
3. Se consideran restricciones que garantizan que una cirugía que comenzó en el bloque de la mañana no puede ser continuada en el bloque de la tarde, debido a que los quirófanos sufren modificaciones en su equipamiento.
4. El concepto de afinidad es extendido a todo el equipo quirúrgico en lugar de solo al cirujano secundario.

El objetivo de este modelo de optimización es maximizar la prioridad de los pacientes atendidos. Para calcular la prioridad de cada paciente (I_{pd}), se utilizan los datos de tiempo de espera y edad del paciente entregados por el hospital para obtener un valor numérico según la Ecuación (1). Donde p representa el ID del paciente y d representa el día asignado a su operación, mientras que $\lfloor x \rfloor$ es el número entero más cercano a x .

$$I_{pd} = 1 + \left\lfloor \frac{0.0001(\text{tiempo de espera}_p)(\text{edad}_p)}{d} \right\rfloor \quad (1)$$

Es importante notar que la Ecuación (1) significa que, a mayores tiempos de espera y edad del paciente, la prioridad aumenta su valor. Además, implica que asignar esta cirugía a un día tardío disminuye el valor prioritario, perjudicando la maximización que busca el modelo de optimización.

El modelo de ILP considera el número de pacientes (N^P), quirófanos (N^O), cirujanos principales (N^M), cirujanos secundarios (N^S), bloques horarios (N^T), días del horizonte de planificación (N^D) y otros miembros del equipo quirúrgico en el quirófano o en el bloque horario t del día d ($N^{E_{oid}}$). A continuación, se presentan los conjuntos e índices.

CONJUNTOS E ÍNDICES

- P Conjunto de pacientes en espera de una cirugía, denotados por el índice p ,
 $\forall p \in \{0, 1, 2, \dots, N^P - 1\}$.
- O Conjunto de quirófanos disponibles para realizar cirugías, denotados por el índice o ,
 $\forall o \in \{0, 1, 2, \dots, N^O - 1\}$.
- M Conjunto de cirujanos principales, denotados por el índice m ,
 $\forall m \in \{0, 1, 2, \dots, N^M - 1\}$.
- S Conjunto de cirujanos secundarios, denotados por el índice s ,
 $\forall s \in \{0, 1, 2, \dots, N^S - 1\}$.
- T Conjunto de bloques horarios en un día, denotados por el índice t ,
 $\forall t \in \{0, 1, 2, \dots, N^T - 1\}$.
- D Conjunto de días en el horizonte de planificación, denotados por el índice d ,
 $\forall d \in \{0, 1, 2, \dots, N^D - 1\}$.
- \bar{D} Conjunto de días en el horizonte de planificación, denotados por el índice d ,
 $\bar{D} = D \cup \{-1\}$. Se agrega el índice -1 en representación del inicio del horizonte de planificación, es decir, el día anterior al día inicial 0 .
- E_{odt} Conjunto de otros miembros del equipo quirúrgico, tales como enfermeros y anestesistas, presentes en el quirófano o y el bloque horario t del día d , denotados por el índice e , $\forall e \in \{0, 1, 2, \dots, N^{E_{odt}} - 1\}$, $\forall o \in O$, $\forall t \in T$, $\forall d \in D$.

PARÁMETROS

- I_{pd} Prioridad del paciente p en el día d , $\forall p \in P$, $\forall d \in D$.
- C_{ms} Toma el valor 1, si el cirujano principal m es igual al cirujano secundario s , 0 en otro caso, $\forall m \in M$, $\forall s \in S$.

D_{mstd}	Toma el valor 1, si el cirujano principal m y el cirujano secundario s están disponibles en el bloque t del día d , 0 en otro caso, $\forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall d \in D$.
J_p	Toma el valor 1, si el paciente p está disponible para ser atendido, 0 en otro caso, $\forall p \in P$.
G_{pm}	Toma el valor 1, si el paciente p puede ser operado por el cirujano m , 0 en otro caso, $\forall p \in P, \forall m \in M$.
Q_{potd}	Toma el valor 1, si el paciente p puede ser operado en el quirófano o en el bloque t del día d , 0 en otro caso, $\forall p \in P, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall d \in D$.
L_p	Tiempo de operación del paciente p , $\forall p \in P$.
H_d	Número de bloques horarios que contiene el día d , $\forall d \in D$.
A_{ms}	Puntaje de afinidad entre el cirujano principal m y el cirujano secundario s , $\forall m \in M, \forall s \in S$.
A_{me}	Puntaje de afinidad entre el cirujano principal m y el miembro e del equipo quirúrgico, $\forall m \in M, \forall e \in E$.
P_{mt}	Puntaje de preferencia del cirujano principal m por el bloque horario t , $\forall m \in M, \forall t \in T$.
P_{md}	Puntaje de preferencia del cirujano principal m por el día d , $\forall m \in M, \forall d \in D$.
V	Valor mínimo de afinidad y preferencia, definido arbitrariamente, utilizado en la versión B para definir sobre qué niveles de afinidad y preferencias deben formarse las relaciones para asignar cirugías.
F	Puntaje diario de afinidad y preferencia asignado a cada cirujano en el inicio de cada día del horizonte de planificación.

VARIABLES DE DECISIÓN

x_{pomstd}	Variable binaria que es igual a 1, si el paciente p es asignado para ser operado en el quirófano o por el cirujano principal m y el cirujano secundario s en el
--------------	---

bloque horario t del día d , 0 en otro caso, $\forall p \in P, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall d \in D$.

y_{pod} Variable binaria que es igual a 1, si el paciente p es asignado para ser operado en el quirófano o en el día d , 0 en otro caso, $\forall p \in P, \forall o \in O, \forall d \in D$.

z_{pms} Variable binaria que es igual a 1, si el paciente p es asignado para ser operado por el cirujano principal m y el cirujano secundario s , 0 en otro caso, $\forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S$.

i_p Variable entera que toma el valor del bloque horario en el que inicia la operación del paciente p , $\forall p \in P$.

t_p Variable entera que toma el valor del bloque horario en el que termina la operación del paciente p , $\forall p \in P$.

f_{md} Variable entera que toma el valor del puntaje restante del cirujano principal m en el día d , $\forall m \in M, \forall d \in \bar{D}$.

RESTRICCIONES

$$\sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} x_{pomstd} \leq 1, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{pomstd} \leq 1, \quad \forall o \in O, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \sum_{m \in M} x_{pomstd} \leq 1, \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \sum_{s \in S} x_{pomstd} \leq 1, \quad \forall m \in M, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} C_{ms} x_{pomstd} \leq 0, \quad \forall m \in M, \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} y_{pod} \leq 1, \quad \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{s \in S} z_{pms} \leq 1, \quad \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} y_{pod} \leq \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} z_{pms}, \quad \forall p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{o \in O} x_{pomstd} \leq D_{mstd} z_{pms}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (10)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{pomstd} \leq H_d J_p, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (11)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} x_{pomstd} \leq H_d G_{pm}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{pomstd} \leq Q_{potd}, \quad \forall p \in P, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (13)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} x_{pomstd} \geq L_p z_{pms}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S \quad (14)$$

$$i_p \leq t \sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} x_{pomstd} + |T| \left(1 - \sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} x_{pomstd} \right), \quad (15)$$

$$\forall p \in P, \forall t \in T$$

$$t_p \geq t \sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} x_{pomstd}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (16)$$

$$i_p = t_p - L_p + 1, \quad \forall p \in P \quad (17)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{poms[\frac{H_d}{2}-1]d} \leq 1 - \sum_{o \in O} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{poms[\frac{H_d}{2}]d}, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (18)$$

$$x_{pomstd} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (19)$$

$$y_{pod} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, \forall o \in O, \forall d \in D \quad (20)$$

$$z_{pms} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S \quad (21)$$

$$i_p \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P \quad (22)$$

$$t_p \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P \quad (23)$$

El conjunto de restricciones (2) evita que un paciente sea asignado a más de un cirujano principal, cirujano secundario, un quirófano y un día distinto al de un bloque horario dado. Las restricciones (3) evitan que se asigne más de una cirugía a un quirófano en un mismo bloque horario del mismo día. Las restricciones (4) y (5) establecen que solo puede haber un cirujano principal y un cirujano secundario asignados a una cirugía, respectivamente. El conjunto de restricciones (6) impiden que un cirujano actúe como cirujano principal y cirujano secundario en la misma operación. Las restricciones (7) indican que un paciente no puede ser asignado a más de un quirófano y a más de un día. Las restricciones (8) establecen que un paciente no puede ser asignado a más de un cirujano principal y a más de un cirujano secundario. Las restricciones (9) interconectan las variables y y z . El conjunto de restricciones (10) permite que solo los cirujanos primarios y secundarios disponibles puedan ser asignados a una cirugía. Las restricciones (11) aseguran que solo se pueda operar a un paciente si se encuentra disponible. El conjunto de restricciones (12) es responsable de establecer que un cirujano principal puede operar a un paciente si y solo si su especialidad es la misma que la requerida por el paciente. De forma similar, las restricciones (13) solo permiten asignar una cirugía a un quirófano si este cumple con las condiciones necesarias para operar al paciente. En las restricciones (14) se interconectan las variables x y z . Los conjuntos de restricciones (15)-(17) aseguran que las operaciones que demoran más de un bloque horario sean asignadas en bloques consecutivos. Las restricciones (18) evitan que una operación sea asignada a un bloque de la mañana y a uno de la tarde, aunque sean consecutivos. Finalmente, las restricciones (19)-(23) definen los dominios de las variables.

3.4.1 ILP-A

La versión A del modelo de ILP (ILP-A) no considera ni afinidad ni preferencias en el equipo quirúrgico. Corresponde a una implementación estándar del problema de asignación de cirugías, y su importancia radica en que permite medir el impacto de considerar afinidad y preferencias en las otras versiones del modelo. Entonces, ILP-A considera las restricciones (2)-(23) y la función objetivo que se presenta en la Ecuación (24).

$$\text{maximizar } \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \alpha I_{pd} y_{pod} \quad (24)$$

La función objetivo (24) está basada en la Ecuación (1). Ésta busca maximizar el valor de prioridad de los pacientes asignados, y está multiplicada por una constante α para poder ser comparada con la función objetivo de las otras versiones.

3.4.2 ILP-B

La versión B del modelo ILP (ILP-B) considera la afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico. En esta versión, estos conceptos son incorporados mediante restricciones, las cuales establecen un nivel mínimo de afinidad y preferencias que debe cumplirse para conformar un equipo quirúrgico. ILP-B considera las restricciones (2)-(23), la función objetivo (24) e incorpora las restricciones que se presentan en (25)-(28):

$$Vz_{pms} \leq z_{pms}A_{ms}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S \quad (25)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} x_{pomstd} \sum_{e \in E_{otd}} A_{me} \leq \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} Vx_{pomstd}, \quad \forall o \in O, \forall m \in M, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (26)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{s \in S} P_{md}x_{pomstd} \leq \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} Vx_{pomstd}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (27)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} P_{mt}x_{pomstd} \leq \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} Vx_{pomstd}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (28)$$

Las restricciones (25) y (26) corresponden a las restricciones encargadas de asegurar que los niveles de afinidad entre un cirujano principal y los demás miembros del equipo quirúrgico sean mayores que el nivel de afinidad mínimo. De manera similar, las restricciones (27) y (28) aseguran que los recursos asignados para cada cirujano principal hayan sido evaluados con un valor de preferencia igual o mayor al nivel de preferencia mínimo establecido.

3.4.3 ILP-C

La versión C del modelo de ILP (ILP-C) incorpora los conceptos de afinidad y preferencias en la función objetivo. Considera las restricciones (2)-(23), la función objetivo que se presenta en la Ecuación (29) y las restricciones (30)-(32).

$$\text{maximizar} \left(\sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \alpha I_{pod} y_{pod} - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} f_{md} \frac{|D|}{d+1} \right) \quad (29)$$

$$f_{m,-1} = 0, \quad \forall m \in M \quad (30)$$

$$f_{md} = f_{m,d-1} + F - \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \left(A_{ms} + \sum_{e \in E_{otd}} A_{me} + P_{mt} + P_{md} \right) \frac{1}{L_p} x_{pomstd} \quad (31)$$

$$\forall m \in M, \forall d \in D$$

$$f_{md} \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall m \in M, \forall d \in \bar{D} \quad (32)$$

La función objetivo (29) incorpora el SPP a las funciones objetivo, donde todo el puntaje no gastado es restado del valor de la prioridad de los pacientes asignados, penalizando el no hacer buenas asignaciones de equipos y recursos. Las restricciones (30) establecen que el puntaje en el día previo al inicio de la planificación, representado por el índice -1, es 0. El conjunto de restricciones (31) calcula el puntaje invertido por día para cada cirujano, al tomar el puntaje acumulado hasta el día anterior más el puntaje aportado según el parámetro F . Luego, se restan los valores de afinidad y preferencias de todas las relaciones formadas en la asignación de la cirugía. De manera adicional, el resultado se multiplica por L_p^{-1} para que las cirugías que duran más de un bloque solo consideren una inversión de puntaje. Por último, en las Ecuaciones (32) se define el dominio de la variable f .

3.5 Formulación del modelo de programación con restricciones

La programación con restricciones (CP) es otra técnica de optimización que aborda los problemas mediante la especificación de restricciones que deben cumplirse para alcanzar una solución. Así, CP consiste en definir una función objetivo a maximizar o minimizar, un conjunto de variables que pueden modificar los valores de la función objetivo y un conjunto de restricciones que limita el

comportamiento de las variables (Rossi et al., 2006; Apt, 2003). Sin embargo, mientras que los modelos de ILP están restringidos a respetar las reglas de linealidad en sus restricciones, función objetivo y el valor entero de todas sus variables, los modelos de CP pueden ir más allá. Pueden utilizar tipos especiales de restricciones, por ejemplo, del tipo *if* \rightarrow *then* (que dice que una restricción solo se aplica si se cumple una condición previa) o del tipo *all different* (que restringe a las variables a tomar valores diferentes). Estas restricciones especiales, en contraste a las de un modelo de programación lineal, se enfocan principalmente en hallar soluciones factibles en vez de centrarse en demostrar la optimalidad. Esto último es la explicación de por qué los modelos de CP destacan principalmente en problemas de asignaciones, programación de trabajos, etc., debido a que estos problemas se caracterizan por sus múltiples y restrictivas restricciones (Chan & Hu, 2002).

El modelo de CP propuesto utiliza los mismos índices y parámetros presentados en la sección anterior. Sin embargo, necesita una formulación distinta para los conjuntos y algunos parámetros adicionales, además de variables de decisión especializadas.

CONJUNTOS E ÍNDICES

- P Conjunto de pacientes en espera de una cirugía, denotados por el índice p ,
 $\forall p \in \{0, 1, 2, \dots, N^P\}$
- O Conjunto de quirófanos disponibles para realizar cirugías, denotados por el índice o ,
 $\forall o \in \{0, 1, 2, \dots, N^O\}$.
- M Conjunto de cirujanos principales, denotados por el índice m , $\forall m \in \{0, 1, 2, \dots, N^M\}$.
- S Conjunto de cirujanos secundarios, denotados por el índice s , $\forall s \in \{0, 1, 2, \dots, N^S\}$.
- T Conjunto de bloques horarios en todo el horizonte de planificación, denotados por el índice t , $\forall t \in \{0, 1, 2, \dots, N^T \times N^D - 1\}$.
- D Conjunto de días en el horizonte de planificación, denotados por el índice d ,
 $\forall d \in \{0, 1, 2, \dots, N^D\}$.
- \bar{D} Conjunto de días en el horizonte de planificación, denotados por el índice d ,
 $\bar{D} = D \cup \{-1\}$. Se agrega el índice -1 en representación del inicio del horizonte de planificación, es decir, el día anterior al día inicial 0.

E_{otd} Conjunto de otros miembros del equipo quirúrgico, tales como enfermeros y anestesistas, presentes en el quirófano o y el bloque horario t del día d , denotados por el índice e , $\forall e \in \{0, 1, 2, \dots, N_{otd}^E\}$, $\forall o \in O$, $\forall t \in T$, $\forall d \in D$.

Es importante notar que, a diferencia del modelo de ILP, los conjuntos O , M y S tienen como valor máximo al valor del parámetro en lugar del valor del parámetro menos uno. Esto se debe a que, en esta formulación, cuando un paciente no es asignado las siguientes variables toman el valor más alto posible para cada parámetro asociado.

PARÁMETROS

W_{mtd} Parámetro que es igual a 1, si el cirujano principal m está disponible en el bloque t del día d , $\forall m \in M$, $\forall t \in T$, $\forall d \in D$.

Y_{std} Parámetro que es igual a 1, si el cirujano secundario s está disponible en el bloque t del día d , $\forall s \in S$, $\forall t \in T$, $\forall d \in D$.

VARIABLES DE DECISIÓN

c_{pd} Variable binaria que toma el valor 1, si el paciente p es asignado para ser operado el día d , 0 en otro caso, $\forall p \in P$, $\forall d \in D$.

o_p Variable que toma el valor del ID del quirófano al cual es asignado el paciente p , $Max(O)$ en caso de no ser asignado, $\forall p \in P$.

m_p Variable que toma el valor del ID del cirujano principal que atiende al paciente p , $Max(M)$ en caso de no existir un cirujano que lo atienda, $\forall p \in P$.

s_p Variable que toma el valor del ID del cirujano secundario que atiende al paciente p , $Max(S)$ en caso de no existir un cirujano que lo atienda, $\forall p \in P$.

t_p Variable que toma el valor del bloque horario en el que comienza la operación del paciente p , $Max(T)$ en caso de que el paciente no haya sido asignado a una operación, $\forall p \in P$.

f_{pmd} Variable que representa el puntaje invertido en la operación del paciente p por el cirujano principal m en el día d , y 0 si es que no existe tal asignación, $\forall p \in P, \forall m \in M, \forall d \in \bar{D}$.

g_{md} Variable que representa el puntaje restante del cirujano m en el día d , $\forall m \in M, \forall d \in \bar{D}$. El índice -1 es incluido por la misma razón que en la variable f .

RESTRICCIONES

$$\text{if } o_i = o_j \wedge o_i < |O| \rightarrow t_i \neq t_j, \quad \forall i, j \in P, i \neq j \quad (33)$$

$$\text{if } o_i = o_j \wedge o_i < |O| \wedge t_i > t_j \rightarrow t_j + L_j \leq t_i, \quad \forall i, j \in P, i \neq j \quad (34)$$

$$\text{if } m_i = m_j \wedge m_i < |M| \rightarrow t_i \neq t_j, \quad \forall i, j \in P, i \neq j \quad (35)$$

$$\text{if } m_i = m_j \wedge m_i < |M| \wedge t_i > t_j \rightarrow t_i + L_j \leq t_i, \quad \forall i, j \in P, i \neq j \quad (36)$$

$$\text{if } s_i = s_j \wedge s_i < |S| \rightarrow t_i \neq t_j, \quad \forall i, j \in P, i \neq j \quad (37)$$

$$\text{if } s_i = s_j \wedge s_i < |S| \wedge t_i > t_j \rightarrow t_j + L_j \leq t_i, \quad \forall i, j \in P, i \neq j \quad (38)$$

$$\text{if } J = 0 \rightarrow m_p \neq m, \quad \forall p \in P, \forall m \in M \quad (39)$$

$$\text{if } c_{pd} = 1 \rightarrow t_p \geq dH_d, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (40)$$

$$\text{if } c_{pd} = 1 \rightarrow t_p < (d + 1)H_d, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (41)$$

$$\text{if } c_{pd} = 1 \rightarrow o_p < |O|, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (42)$$

$$\text{if } c_{pd} = 1 \rightarrow s_p < |S|, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (43)$$

$$\text{if } c_{pd} = 1 \rightarrow m_p < |M|, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (44)$$

$$\text{if } m_p \geq |M| \rightarrow o_p \geq |O| \wedge s_p \geq |S|, \quad \forall p \in P \quad (45)$$

$$\text{if } o_p \geq |O| \rightarrow m_p \geq |M| \wedge s_p \geq |S|, \quad \forall p \in P \quad (46)$$

$$\text{if } s_p \geq |S| \rightarrow o_p \geq |O| \wedge m_p \geq |M|, \quad \forall p \in P \quad (47)$$

$$\text{if } C_{ms} = 1 \rightarrow (\text{if } m_p = m \rightarrow s_p \neq s), \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S \quad (48)$$

$$\text{if } t_p \geq dH_d \wedge t_p < (d+1)H_d \rightarrow t_p + L_p \leq (d+1)H_d, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (49)$$

$$\text{if } Q_{potd} = 0 \rightarrow (\text{if } o_p = o \wedge t_p = dH_d + t \rightarrow o_p = |O|), \forall p \in P, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (50)$$

$$\text{if } W_{mtd} = 0 \rightarrow (\text{if } t_p = dH_d + t \rightarrow m_p \neq m), \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (51)$$

$$\text{if } Y_{std} = 0 \rightarrow (\text{if } t_p = dH_d + t \rightarrow s_p \neq s), \quad \forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (52)$$

$$\text{if } J_p = 0 \rightarrow m_p \geq |M|, \quad \forall p \in P \quad (53)$$

$$\left\lfloor (t_p \bmod |T|) \frac{2}{|T|} \right\rfloor = \left\lfloor ((t_p + L_p - 1) \bmod |T|) \frac{2}{|T|} \right\rfloor, \quad \forall p \in P \quad (54)$$

$$c_{pd} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (55)$$

$$o_p \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P \quad (56)$$

$$m_p \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P \quad (57)$$

$$s_p \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P \quad (58)$$

$$t_p \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P \quad (59)$$

Las restricciones (33) y (34) impiden el solapamiento de quirófanos. Similarmente, las restricciones (35) y (36) impiden el solapamiento de cirujanos principales, mientras que las restricciones (37) y (38) impiden el solapamiento de cirujanos secundarios. Las restricciones (39) establecen que un cirujano principal puede operar a un paciente solo si su especialidad coincide con la requerida. En el conjunto de restricciones (40)-(44) se dicta que, para que la variable c tome un valor igual a uno, las demás variables deben estar asignadas a un paciente. Esto implica que estas variables deben tomar

valores inferiores al máximo posible. Las restricciones (45)-(47) aseguran que, si una variable toma el valor máximo, entonces las demás también deben tomarlo. El conjunto de restricciones (48) impide que un cirujano sea asignado como cirujano principal y cirujano secundario a la misma cirugía. En las restricciones (49) se evita que una cirugía pueda comenzar en un día y terminar en otro. Las restricciones (50) aseguran que un paciente solo pueda ser asignado a un quirófano, si este cumple con las condiciones necesarias para que sea operado en un bloque horario específico. Las restricciones (51) y (52) indican que no se puede asignar un cirujano a una cirugía, si éste no está disponible. Similarmente, en las restricciones (53) se evita que se asigne un paciente a una cirugía si éste no está disponible. Las restricciones (54) impiden que una cirugía que empieza en un bloque de la mañana continúe en un bloque de la tarde. Finalmente, en las restricciones (55)-(59) se establece el dominio de las variables.

3.5.1 CP-A

La versión A del modelo de CP (CP-A) no considera ni afinidad ni preferencias en el equipo quirúrgico. Corresponde a una implementación estándar del problema de asignación de cirugías, y su importancia radica en que permite medir el impacto de considerar afinidad y preferencias en las otras versiones del modelo. CP-A considera las restricciones (33)-(59) y la función objetivo presentada en (60).

$$\text{maximizar } \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \alpha I_{pd} c_{pd} \quad (60)$$

La función objetivo (60) está basada en la Ecuación (1). Ésta busca maximizar el valor de prioridad de los pacientes asignados, y está multiplicada por una constante α para poder ser comparada con la función objetivo de las otras versiones.

3.5.2 CP-B

La versión B del modelo CP (CP-B) considera la afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico. Esta versión incorpora los factores de relación humana mediante restricciones, las cuales establecen un

nivel mínimo de afinidad y preferencias que debe cumplirse para conformar un equipo quirúrgico. CP-B considera las restricciones (33)-(59), la función objetivo (60) y las restricciones (61)-(65).

$$\text{if } A_{ms} < V \wedge m_p = m \rightarrow s_p \neq s, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall s \in S \quad (61)$$

$$\text{if } A_{me} < V \wedge m_p = m \rightarrow o_p \neq o \vee t_p < d|T| + t \bmod 2 \vee t_p \geq d|T| + t \bmod 2 + \frac{|T|}{2}, \quad (62)$$

$$\forall p \in P, \forall m \in M, \forall o \in O, \forall d \in D, \forall t \in T, \forall e \in E_{otd}$$

$$\text{if } P_{md} < V \wedge m_p = m \rightarrow t_p < dH_d \vee t_p \geq (d+1)H_d, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall d \in D \quad (63)$$

$$\text{if } P_{mt} < V \wedge m_p = m \rightarrow t_p \bmod |T| \geq \frac{|T|}{2}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall t \in \{0, \dots, \frac{|T|}{2} - 1\} \quad (64)$$

$$\text{if } P_{mt} < V \wedge m_p = m \rightarrow t_p \bmod |T| < \frac{|T|}{2}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall t \in \{\frac{|T|}{2}, \dots, |T|\} \quad (65)$$

Las restricciones (61) garantizan un nivel de afinidad mínimo entre el cirujano principal y el cirujano secundario. El conjunto (62) garantiza un nivel de afinidad mínimo entre el cirujano principal y todos los demás miembros del equipo quirúrgico asignados a un quirófano en un bloque horario. Las restricciones (63)-(65) aseguran que se cumpla el nivel mínimo de preferencias del cirujano principal por el día y bloque horario asignados a la cirugía.

3.5.3 CP-C

La versión C del modelo de CP (CP-C) incorpora los conceptos de afinidad y preferencias en la función objetivo. CP-C considera las restricciones (33)-(59), la función objetivo que se muestra en la Ecuación (66) y las restricciones adicionales (67)-(71).

$$\text{maximizar } \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \alpha I_{pd} c_{pd} - \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} g_{md} \left(\frac{|D|}{d+1} \right) \quad (66)$$

$$g_{m,-1} = 0, \quad \forall m \in M \quad (67)$$

$$\begin{aligned}
& \text{if } m_p = m \wedge \frac{t_p}{|T|} \geq d - 1 \wedge \frac{t_p}{|T|} < d \\
& \rightarrow f_{psd} = A_{m_p s_p} + \sum_{e \in E_{ota}} A_{m_p e} + P_{m_p \frac{t_p}{|D|}} + P_{m_p t_p \bmod \frac{|T|}{4}}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall d \in D
\end{aligned} \tag{68}$$

$$g_{md} = F + g_{m,d-1} - \sum_{p \in P} f_{pmd}, \quad \forall m \in M, \forall d \in D \tag{69}$$

$$f_{pmd} \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall p \in P, \forall m \in M, \forall d \in \bar{D} \tag{70}$$

$$g_{md} \in \mathbb{Z}_{0+}, \quad \forall m \in M, \forall d \in \bar{D} \tag{71}$$

La función objetivo (66) es equivalente a la función objetivo ILP-C y busca maximizar la prioridad de los pacientes mientras penaliza el no uso de los puntajes de los cirujanos mediante el SPP. Las restricciones (67) inicializan el puntaje de los cirujanos en 0 al principio del horizonte de planificación. Las restricciones (68) calculan el puntaje necesario de los cirujanos para ser asignados a una cirugía con un equipo quirúrgico y con recursos específicos. Las restricciones (69) establecen que el puntaje de un cirujano para cada día está definido por el puntaje diario asignado más el puntaje restante de días anteriores menos el puntaje invertido en las cirugías del día actual. Finalmente, las restricciones (70) y (71) establecen el dominio de las variables f y g , respectivamente.

4 RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados computacionales para los dos modelos propuestos y sus versiones correspondientes. Se presenta el detalle de las 18 instancias utilizadas para validar los modelos propuestos y, finalmente, el detalle de los resultados de los modelos propuestos y una discusión.

4.1 Configuración de hardware y software

El computador utilizado para implementar la investigación, redactar este documento y ejecutar instancias de prueba más pequeñas es un equipo personal, correspondiente a una laptop HP Windows 11 de 64 bits, que cuenta con un procesador Intel Core i7-1255U de 12va generación y 16 GB de RAM.

Los experimentos finales fueron ejecutados en un súper computador NLHCP, que cuenta con 5236 CPU *cores*, 20480 GPU *cores* y 22 TB de RAM. En particular, se trabaja con la partición *largemem*, que cuenta con nueve nodos de modelo Dell PowerEdge R640, procesador 2 x Intel Xeon Gold 6152 CPU @ 2.10GHz, 22 *cores* C./U y 765 GB de RAM.

El modelo de ILP es implementado en CPLEX 12.9 con Python 3.9, mientras que el modelo de CP es implementado y ejecutado en el *solver* de CP de CPLEX 12.9 con Python 3.9. Además, todos los modelos fueron ejecutados en un solo hilo (*thread*) o secuencialmente.

4.2 Generación de instancias

Los datos que se utilizan en esta memoria de título son obtenidos a partir de un hospital público de Chile. Estos datos son de carácter confidencial y no pueden ser distribuidos, pero, en resumen, incluyen la siguiente información:

1. **Pacientes:** considera edad, sexo, ciudad de residencia, entre otros. Los datos de interés para la implementación de los modelos son cuánto tiempo lleva esperando por una cirugía, el tipo de cirugía que requiere el paciente y el tiempo aproximado de cirugía requerido.
2. **Cirujanos:** información de los cirujanos primarios y secundarios. En algunos casos, los cirujanos primarios también pueden ser cirujanos secundarios. Cada cirujano tiene asociada una especialidad, que en el caso del cirujano primario significa a qué tipo de pacientes pueden

atender. Además, se cuenta con una tabla de disponibilidad de los cirujanos para cada bloque horario, permitiendo saber en qué momentos un cirujano está o no disponible para realizar cirugías.

- 3. Quirófanos:** información de los cuatro quirófanos del hospital público. Cada quirófano cuenta con equipamiento necesario para efectuar solo un tipo de operación, y este equipamiento cambia dependiendo del quirófano, el día de la semana y el bloque horario del día (mañana o tarde). Los quirófanos están disponibles de lunes a viernes, de 8 a.m. a 5 p.m. Además, cada quirófano cuenta con un grupo de enfermeras, anestesistas y/u otros especialistas de la salud requeridos para efectuar las cirugías asociadas a cada tipo de requerimiento. Esto es útil para simular la afinidad entre el equipo quirúrgico más adelante.

De manera adicional a los datos otorgados por este hospital, alguna información es simulada para ser complementada con la real. Estos datos simulados corresponden principalmente a la información de los profesionales auxiliares en la cirugía, los puntajes de afinidad y los puntajes de preferencias asociados a cada cirujano principal.

La información entregada por el hospital incluye ciudades de origen, dirección, edad, sexo, tiempos de espera, nombres, datos de prestaciones, identificadores del paciente y del cirujano asignado, policlínicos de origen y destino, etc. Sin embargo, la información relevante del modelo se ve reducida al tipo de cirugía necesitada por el paciente, su edad, especialidades de los cirujanos y datos de los quirófanos.

Respecto a la información de la lista de espera, éstas varían entre semanas, y se considera un horizonte de planificación de una semana (5 días hábiles). La prioridad de los pacientes es calculada según la Ecuación (1), considerando la edad del paciente, su tiempo de espera y el día de su operación.

El número de recursos considerados en los modelos propuestos se mantiene constante para todas las instancias, con excepción de los días considerados en el horizonte de planificación, los cuales varían entre uno y cinco. Se consideraron diez cirujanos, los cuales pueden ser asignados como cirujanos principales o secundarios, y el uso de los cuatro quirófanos disponibles en el hospital.

Tabla 3: Resumen de las cirugías impartidas por quirófano.

Quirófano	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Mañana					
Q-A	Cirugía General	Cirugía Infantil	Cirugía General	Cirugía General	Cirugía General
Q-B	Cirugía General	Traumatología	Cirugía General	Cirugía General	Traumatología
Q-C	Oftalmología	Cirugía General	Cirugía Infantil	Oftalmología	Cirugía General
Q-D	Ginecología	Ginecología	Otorrino- laringología	Ginecología	Ginecología
Tarde					
Q-A	Cirugía Infantil	Cirugía Infantil	Otorrino- laringología	Cirugía Infantil	Otorrino- laringología
Q-B	Cirugía General	Traumatología	Traumatología	Traumatología	Traumatología
Q-C	Oftalmología	Cirugía General	Oftalmología	Oftalmología	Cirugía General
Q-D	Otorrino- laringología	Ginecología	Cirugía General	Otorrino- laringología	Otorrino- laringología

Las especialidades de los diez cirujanos considerados en las instancias son cirugía general (dos cirujanos), otorrinolaringología (dos cirujanos), ginecología (dos cirujanos), cirugía infantil (un cirujano) y oftalmología (un cirujano). Notar que el total de especialidades consideradas es de seis, pero cualquier número es aceptado según el contexto de cada hospital. Además, la Tabla 3 muestra el tipo de cirugía que admite cada quirófano (A, B, C y D) según el equipamiento preparado en ellos para cada día y bloque de mañana y tarde.

En base a los datos anteriores se crean 18 instancias, las cuales se describen con detalle en la Tabla 4. Los pacientes considerados oscilan entre 32 y 553. Los días considerados como horizonte de planificación son de uno, tres y cinco días. En las 18 instancias se consideró un grupo fijo de 10 cirujanos. Cada instancia considera dos casos en la versión B, un nivel mínimo de afinidad y preferencias de 1 punto y otro de 2 puntos. Cabe destacar que un nivel de afinidad y preferencias de 0 puntos significa que no hay consideración de estos factores de relación humana. Por tanto, la versión

A y la versión B con nivel de afinidad y preferencias de 0 puntos son equivalentes. Cada instancia considera dos casos en la versión C: un valor de puntaje diario para el SPP de 40 puntos y otro de 50 puntos. Estos valores fueron obtenidos mediante experimentación.

Tabla 4: Resumen de las instancias.

Instancia	Pacientes	Días
I ₁	32	1
I ₂	32	3
I ₃	32	5
I ₄	60	1
I ₅	60	3
I ₆	60	5
I ₇	120	1
I ₈	120	3
I ₉	120	5
I ₁₀	180	1
I ₁₁	180	3
I ₁₂	180	5
I ₁₃	240	1
I ₁₄	240	3
I ₁₅	240	5
I ₁₆	553	1
I ₁₇	553	3
I ₁₈	553	5

4.3 Resultados de los experimentos

En esta sección se detallan los experimentos realizados con los modelos propuestos. Todos los modelos son ejecutados con un tiempo límite de una hora.

4.3.1 Experimento A

Para la ejecución de este experimento se consideran las versiones A de ambos modelos, ILP-A y CP-A, que no consideran las afinidades y preferencias.

El objetivo de este experimento es obtener la planificación base de las cirugías, puesto que no considera ninguna forma de afinidad en el equipo quirúrgico ni preferencias del cirujano principal. Así, los resultados obtenidos reflejan las asignaciones en su forma más simple, y permiten conocer el impacto de aplicar restricciones e implementar el SPP en las versiones B y C, respectivamente.

La Tabla 5 muestra los resultados del modelo de ILP-A y de CP-A. Las columnas muestran el valor encontrado de la función objetivo, el *upper bound* (UB), el tiempo de construcción del modelo, el tiempo de ejecución requerido para encontrar la solución, la brecha porcentual de optimalidad o *gap* (es decir, la brecha porcentual entre el UB y el objetivo encontrado al final del proceso de resolución) y la cantidad de pacientes atendidos. Adicionalmente, la última corresponde a la brecha porcentual entre el modelo de ILP y el modelo de CP. Un valor positivo implica que el modelo de ILP encuentra una mejor solución, mientras que un valor negativo implica que el modelo de CP encuentra una mejor solución. Un valor de 0% significa que ambos modelos encuentran la misma solución.

Tabla 5: Resultados de los modelos de ILP-A y de CP-A.

Instancia	Modelo de ILP-A						Modelo de CP-A						Gap entre modelos
	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	
I ₁	103000	103000	33,9	8,0	0,0%	23	103000	118566	0,9	3600,5	15,1%	23	0,0%
I ₂	119000	119000	99,3	30,9	0,0%	31	119000	210769	1,0	3600,7	77,1%	31	0,0%
I ₃	121000	121000	175,6	284,5	0,0%	32	121000	291385	1,4	3600,8	140,8%	32	0,0%
I ₄	134000	134000	57,1	19,9	0,0%	29	134000	175662	3,6	3601,8	31,1%	29	0,0%
I ₅	179000	179000	204,4	382,9	0,0%	59	179000	364126	3,9	3602,1	103,4%	59	0,0%
I ₆	181000	181000	331,7	975,5	0,0%	60	180000	529525	3,9	3602,1	194,2%	60	0,6%
I ₇	167000	167000	134,7	32,4	0,0%	32	167000	430559	13,4	3606,0	157,8%	32	0,0%
I ₈	272000	315250	397,3	3614,5	15,9%	82	233000	951959	14,2	3605,8	308,6%	77	14,3%
I ₉	303000	394588	829,3	3623,4	30,2%	111	305000	1306280	15,1	3607,3	328,3%	112	-0,7%
I ₁₀	177000	177000	260,6	73,4	0,0%	32	177000	730176	31,8	3614,6	312,5%	32	0,0%
I ₁₁	315000	356238	871,4	3620,8	13,1%	91	281000	1543510	34,5	3616,4	449,3%	84	10,8%
I ₁₂	377000	513706	1375,4	3646,5	36,3%	134	309000	2079100	31,6	3616,2	572,8%	115	18,0%
I ₁₃	198000	198000	386,8	120,5	0,0%	31	185000	1127110	53,8	3624,2	509,2%	30	6,6%
I ₁₄	358000	432285	1229,5	3636,3	20,8%	95	267000	2216940	55,1	3625,6	730,3%	84	25,4%
I ₁₅	432000	619464	1890,6	3652,2	43,4%	144	347000	2961020	64,6	3627,1	753,3%	125	19,7%
I ₁₆	213000	213000	624,3	302,7	0,0%	32	162000	2777910	334,6	3766,7	1614,8%	29	23,9%
I ₁₇	390000	573535	2079,6	3647,0	47,1%	96	259000	5508250	369,2	3771,9	2026,7%	76	33,6%
I ₁₈	-	920250	3233,9	3695,9	-	-	365000	7253020	331,9	3772,9	1887,1%	130	-
Promedio	224278	320005	789,8	1742,7	12,2%	62	220778	1697395	75,9	3636,8	567,4%	65	9,0%

Puede observarse que el promedio del valor encontrado para la función objetivo es más alto para el modelo de ILP, lo cual significa que el modelo de ILP asigna más cirugías de prioridad alta que el modelo de CP. Además, el promedio del *gap* para ILP es mucho más bajo, mostrando que puede demostrar optimalidad con facilidad. La cantidad de óptimos encontrados por el modelo de ILP es de 10, mientras que la cantidad de óptimos encontrada por el modelo de CP es de 7. El promedio de pacientes atendidos es ligeramente superior para CP, pero esto se debe a que ILP no encuentra solución para la instancia I_{18} en el tiempo asignado. Finalmente, el promedio para la brecha porcentual entre modelos es de 9,0%, que significa que el modelo ILP encuentra soluciones que, en promedio, son 9,0% mejores que las que encuentra CP.

La Figura 2 muestra la cantidad de pacientes atendidos en cada instancia. En general, ILP-A logra asignar un mayor número de pacientes a una cirugía, exceptuando el caso de la instancia I_{18} , puesto que en el tiempo límite no fue capaz de encontrar una solución factible.

La Figura 3 muestra la RAM utilizada por ILP-A y CP-A. Se observa que CP-A necesita mucha menos memoria que ILP-A para encontrar soluciones. Hasta la instancia I_{15} se mantiene estable en sus requerimientos, mientras que el modelo de ILP incrementa de forma constante su uso de RAM. El uso máximo de memoria para ILP es de 88,4 GB, y para CP es de 6,6 GB. Por lo tanto, para este experimento, CP-A requiere tan solo un 7,5% de RAM de lo que necesita ILP-A.



Figura 2: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento A.

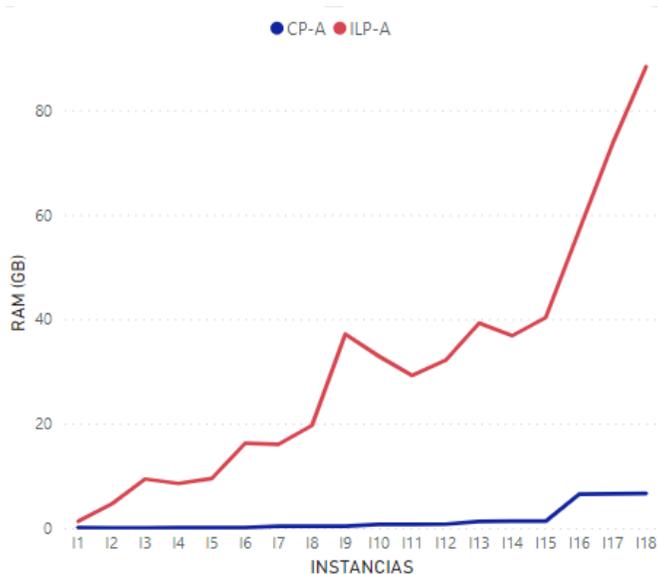


Figura 3: RAM (GB) utilizada en el experimento A.

4.3.2 Experimento B

Para la ejecución de este experimento se usan las versiones B de ambos modelos, ILP-B y CP-B, que consideran las afinidades y preferencias modeladas como restricciones. En este caso, cada instancia se ejecuta con dos niveles de afinidad y preferencias (NAP) distintos: con NAP igual a 1 (NAP-1), y con NAP igual a 2 (NAP-2).

El valor promedio de la función objetivo es superior otra vez para el modelo de ILP en el experimento B. Este comportamiento se observa en la Tabla 6, con un nivel de afinidad y preferencias de 1 (NAP-1), y en la Tabla 7, con un nivel de afinidad y preferencias de 2 (NAP-2). Ambas tablas tienen el mismo formato que la Tabla 5. ILP-B presenta más pacientes atendidos que CP-B, aunque la diferencia no es muy significativa. Los tiempos de ejecución son sustancialmente más grandes para este último, debido a que para los modelos de programación con restricciones es muy difícil demostrar la optimalidad de las soluciones. Por último, se puede observar que, en promedio, las soluciones de ILP-B son 7,0% mejores que las soluciones de CP-B al tener en cuenta un NAP-1, y son 5,0% mejores al tener en cuenta un NAP-2. La diferencia es menor que la presentada entre ILP-A y CP-A, lo cual puede implicar que el modelo de CP mejora un poco en su versión B al compararla con su versión A.

Tabla 6: Resultados de los modelos de ILP-B y CP-B con NAP-1.

Instancia	Modelo de ILP-B						Modelo de CP-B						Gap entre modelos
	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	
I ₁	64000	64000	67,0	6,7	0,0%	15	64000	82226	1,8	3601,1	28,5%	15	0,0%
I ₂	82000	82000	196,0	28,4	0,0%	23	82000	158772	2,2	3601,4	93,6%	23	0,0%
I ₃	86000	86000	187,6	72,7	0,0%	26	86000	196492	3,2	3602,2	128,5%	26	0,0%
I ₄	66000	66000	80,5	5,7	0,0%	15	66000	97517	6,9	3603,3	47,8%	15	0,0%
I ₅	100000	100000	228,0	24,8	0,0%	33	100000	253469	6,9	3603,0	153,5%	33	0,0%
I ₆	106000	106000	645,9	188,3	0,0%	38	106000	351600	7,39	3604,8	231,7%	38	0,0%
I ₇	83000	83000	286,7	18,8	0,0%	15	83000	356322	23,5	3609,6	329,3%	16	0,0%
I ₈	155000	179678	702,3	3615,7	15,9%	45	141000	937068	25,5	3611,9	564,6%	42	9,0%
I ₉	172000	183333	1196,8	3628,3	6,6%	57	166000	1188490	27,9	3614,0	616,0%	58	3,5%
I ₁₀	93000	93000	418,6	20,8	0,0%	16	93000	734257	49,8	3624,6	689,5%	16	0,0%
I ₁₁	186000	201750	1230,8	3628,5	8,5%	48	153000	1543500	54,4	3625,7	908,8%	43	17,7%
I ₁₂	214000	245500	1975,1	3636,5	14,7%	68	190000	1983060	53,4	3627,3	943,7%	63	11,2%
I ₁₃	102000	102000	627,1	43,3	0,0%	16	102000	1119240	94,7	3638,1	997,3%	16	0,0%
I ₁₄	206000	206000	1712,1	781,5	0,0%	48	177000	2252010	89,1	3642,6	1172,3%	44	14,1%
I ₁₅	241000	251250	1416,4	3635,5	4,3%	68	183000	2961000	93,9	3649,5	1518,0%	61	24,1%
I ₁₆	112000	112000	749,7	59,8	0,0%	16	112000	2814010	305,2	3730,7	2412,5%	16	0,0%
I ₁₇	216000	266571	2162,8	3649,6	23,4%	48	162000	5508000	327,8	3749,9	3300,0%	41	25,0%
I ₁₈	256000	442857	5377,2	3709,8	73,0%	68	179000	7139690	279,9	3722,9	3888,7%	60	30,1%
Promedio	141111	159496	1070,0	1486,4	8,1%	37	124722	1648707	80,7	3636,8	1001,3%	35	7,0%

Las Figuras 4 y 5 muestran los gráficos que comparan la cantidad de pacientes atendidos para cada instancia. El primero corresponde a los pacientes atendidos por la versión B de cada modelo considerando un NAP-1, mientras que el segundo muestra las instancias que consideran un NAP-2. En rojo se destacan los pacientes atendidos en ILP-B y en azul aparecen los pacientes atendidos en CP-B. Se puede notar que, en ambos gráficos, la primera mitad de los pacientes atendidos coinciden en gran medida, pero desde la instancia I₉ en adelante, ILP-B consigue hallar una distribución de cirugías tal que se atienden más pacientes que en CP-B. Con NAP-1, el máximo de pacientes atendidos en ILP-B es de 68, un 52,2% menos que en ILP-A, mientras que en CP-B es de 63, un 51,5% menos que en CP-A. Con NAP-2, el máximo de pacientes atendidos en ILP-B es de 44, lo que significa una disminución del 69,4% con respecto a ILP-A. Mientras, en CP-B el máximo de pacientes atendidos es de 40, una disminución del 69,2% con respecto a CP-A.

Tabla 7: Resultados de los modelos de ILP-B y CP-B con NAP-2.

Instancia	Modelo de ILP-B						Modelo de CP-B						Gap entre modelos
	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	
I ₁	52000	52000	57,0	3,8	0,0%	12	52000	79676	1,3	3600,9	53,2%	12	0,0%
I ₂	74000	74000	170,8	19,7	0,0%	22	74000	163854	2,3	3601,5	121,4%	22	0,0%
I ₃	79000	79000	280,7	75,7	0,0%	26	79000	181657	2,6	3601,9	129,9%	26	0,0%
I ₄	54000	54000	127,1	6,6	0,0%	12	54000	99078	5,0	3602,5	83,5%	12	0,0%
I ₅	80000	80000	338,5	30,5	0,0%	26	80000	200132	4,7	3602,6	150,2%	26	0,0%
I ₆	87000	87000	481,6	74,5	0,0%	32	87000	277618	5,3	3603,6	219,1%	32	0,0%
I ₇	67000	67000	209,6	12,2	0,0%	12	67000	278592	15,4	3607,0	315,8%	12	0,0%
I ₈	119000	119000	561,9	96,7	0,0%	32	114000	893825	16,6	3608,4	684,1%	31	4,2%
I ₉	132000	132000	977,5	203,3	0,0%	42	129000	1188490	23,6	3613,3	821,3%	40	2,3%
I ₁₀	77000	77000	331,2	19,3	0,0%	11	77000	622038	42,6	3619,3	707,8%	12	0,0%
I ₁₁	137000	137000	951,4	218,6	0,0%	32	127000	1472270	43,7	3621,1	1059,3%	30	7,3%
I ₁₂	157000	157000	1477,1	1535,4	0,0%	44	141000	2079000	49,5	3625,6	1374,5%	40	10,2%
I ₁₃	82000	82000	462,9	27,2	0,0%	12	81000	876216	72,7	3632,8	981,7%	12	1,2%
I ₁₄	146000	146000	1250,6	238,6	0,0%	32	130000	2114530	77,4	3641,2	1526,6%	30	11%
I ₁₅	166000	170500	2065,4	3646,5	2,7%	44	140000	2869190	58,4	3629,3	1949,4%	40	15,7%
I ₁₆	88000	88000	1099,2	73,6	0,0%	12	88000	2180000	388,6	3761,3	2377,3%	12	0,0%
I ₁₇	152000	178035	2303,9	3655,0	17,1%	32	115000	5508000	332,3	3766,4	4689,6%	28	19,7%
I ₁₈	176000	251321	4145,9	3688,8	42,8%	44	122000	7253020	352,5	3773,9	5845,1%	36	50,0%
Promedio	106944	112825	960,7	757,0	3,5%	27	97611	1574288	83,0	3639,6	1282,1%	25	5,0%

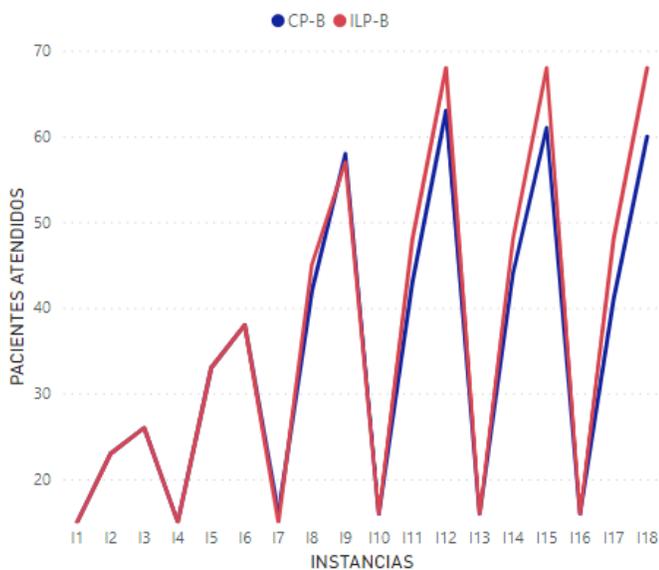


Figura 4: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento B – NAP-1.

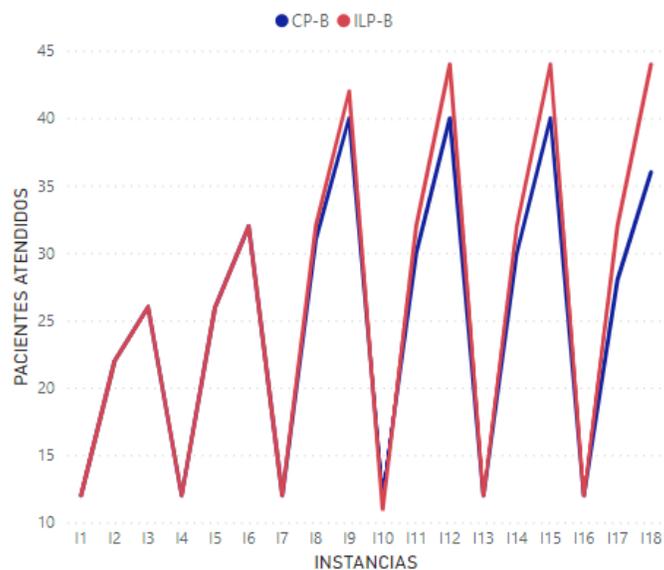


Figura 5: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento B – NAP-2.

Las Figuras 6 y 7 comparan la RAM utilizada por los modelos para resolver las instancias, con NAP igual a uno y a dos puntos, respectivamente. En rojo se destaca ILP-B, mientras que en azul aparecen los datos de CP-B. Se puede apreciar que el modelo de ILP ocupa mucha más memoria que el modelo de CP en todas las instancias. Este último se mantiene prácticamente estable sin importar el tamaño de la instancia. Con NAP-1, la RAM máxima usada en ILP-B es de 108,3 GB, mientras que la RAM máxima para CP-B es de 6,8 GB. Por otro lado, con NAP-2, la RAM máxima usada en ILP-B es de 109,9 GB, mientras que para CP-B es de 6,9 GB. En promedio, ambos modelos mantienen constante su uso de RAM al cambiar de NAP-1 a NAP-2.

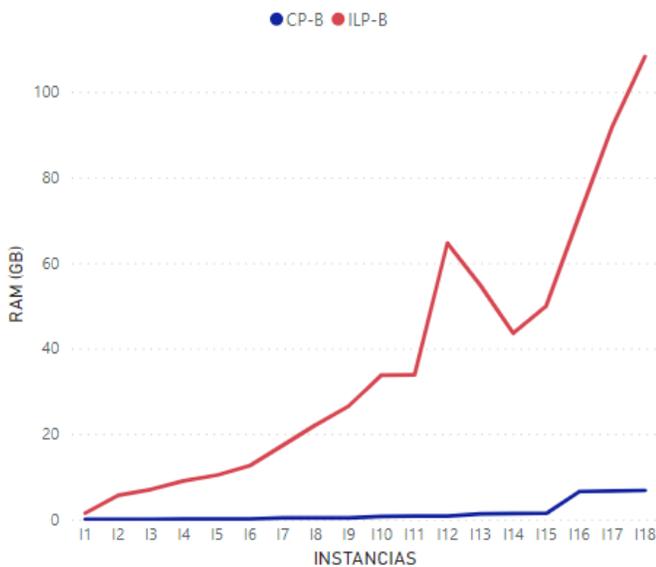


Figura 6: RAM (GB) utilizada en el experimento B – NAP-1.

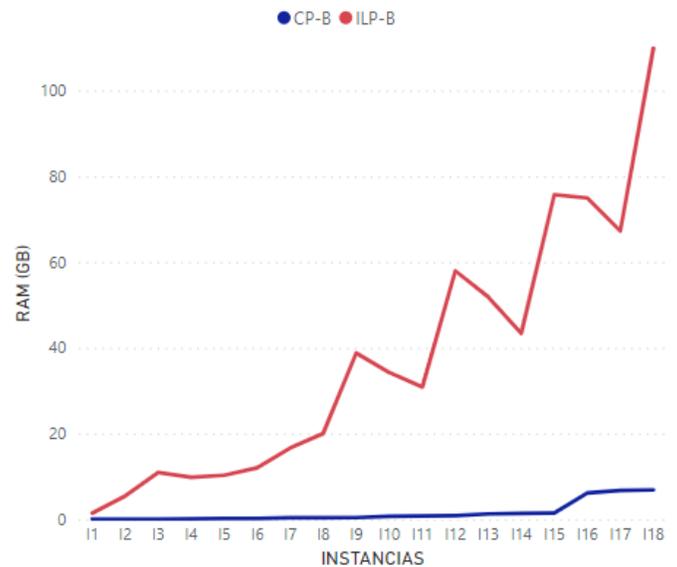


Figura 7: RAM (GB) utilizada en el experimento B – NAP-2.

4.3.3 Experimento C

Para la ejecución de este experimento se usan las versiones C de ambos modelos, ILP-C y CP-C, que consideran las afinidades y preferencias a través del SPP. En este caso, cada instancia se ejecuta con dos puntajes diarios distintos del SPP. Mediante una experimentación previa, se determinó que los valores con mejores resultados al ejecutar la versión C, corresponden a un puntaje diario de 40 (SPP-40) y 50 (SPP-50).

Con los resultados de este experimento, se puede medir el impacto de implementar el SSP al contrastarlos con los resultados de la versión A. Al mismo tiempo, es posible comparar los resultados

de esta versión con los resultados de la versión B, con el fin de determinar si es mejor considerar la afinidad y preferencias como restricciones o el modelarlas a través del SPP.

Tabla 8: Resultados de los modelos de ILP-C y CP-C con SPP-40.

Instancia	Modelo de ILP-C						Modelo de CP-C						Gap entre modelos
	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	
I ₁	102815	102815	17,6	16,4	0,0%	23	102815	120288	1,4	3600,8	17,0%	23	0,0%
I ₂	134155	134311	45,5	3600,8	0,1%	31	117057	223210	2,4	3601,2	90,7%	31	12,7%
I ₃	135502	136276	71,6	3601,6	0,6%	32	114320	307113	3,5	3601,8	168,6%	32	15,6%
I ₄	127847	127855	24,6	3,3	0,0%	28	127855	186171	5,2	3602,7	45,6%	28	0,0%
I ₅	212786	212956	76,8	3601,6	0,1%	59	170730	387464	6,6	3604,2	126,9%	59	19,8%
I ₆	215086	216351	135,1	3602,8	0,6%	60	166857	537294	9,0	3605,4	222,0%	60	22,4%
I ₇	146855	150429	59,1	3600,7	2,4%	28	146855	445078	21,0	3609,7	203,1%	28	0,0%
I ₈	363039	363380	158,0	3603,1	0,1%	81	235911	998004	25,4	3611,9	323,0%	74	35,0%
I ₉	475270	479670	284,4	3604,1	0,9%	112	275884	1306140	25,7	3610,3	373,4%	112	42,0%
I ₁₀	156855	159855	60,5	3601,1	1,9%	28	156855	734234	41,0	3617,8	368,1%	28	0,0%
I ₁₁	443033	444075	255,0	3603,7	0,2%	88	232848	1543460	43,7	3620,9	562,9%	77	47,4%
I ₁₂	619623	632283	365,5	3605,4	2,0%	128	285756	2079000	48,7	3624,0	627,5%	122	53,9%
I ₁₃	174855	179140	67,3	3601,2	2,5%	28	164853	1119230	86,7	3638,8	578,9%	28	5,7%
I ₁₄	514011	518030	204,9	3604,0	0,8%	90	246849	2252000	68,8	3632,5	812,3%	82	52,0%
I ₁₅	773732	785757	340,1	3605,8	1,6%	139	304554	2961000	66,7	3632,3	872,2%	124	60,6%
I ₁₆	186855	192855	160,6	3602,7	3,2%	28	172846	2814010	298,4	3715,9	1528,0%	28	7,5%
I ₁₇	588011	595870	464,8	3610,7	1,3%	90	-	-	299,0	3733,4	-	0	-
I ₁₈	992563	1002403	795,5	3614,2	1,0%	150	68458	7253010	341,3	3758,6	10495%	45	93,1%
Promedio	353494	357462	199,3	3204,6	1,0%	68	181841	1486277	77,4	3634,5	1024,4%	55	28,0%

Las Tablas 8 y 9 muestran los resultados de la versión C de los modelos, considerando SPP-40 y SPP-50, respectivamente. Estas tablas presentan el mismo formato que las Tablas 5, 6 y 7. Con SPP-40, ILP-C atiende un máximo de pacientes de 150 en la instancia I₁₈. ILP-A no alcanza a encontrar una solución factible en el tiempo límite, por lo que no considera pacientes atendidos en esa instancia. Si se comparan en la instancia I₁₅, se ve que en ILP-C se asignan 139 pacientes, mientras que en ILP-A se asignan 144. Esto representa una disminución de tan solo un 3,5%. CP-C, por su parte, tiene un máximo de pacientes atendidos de 124, y CP-A tiene un máximo de 130 pacientes, mostrando una disminución de 4,6%. Con SPP-50, el máximo de pacientes atendidos en ILP-C (sin considerar la instancia I₁₈) es de 142, un 1,4% menos que ILP-A, y el máximo de pacientes atendidos por CP-C es de 129, tan solo un 0,8% menos que CP-A. Esto demuestra que incrementar el puntaje del SPP acerca más las versiones A y C.

Tabla 9: Resultados de los modelos de ILP-C y CP-C con SPP-50.

Instancia	Modelo de ILP-C						Modelo de CP-C						Gap entre modelos
	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	Objetivo	UB	Tiempo de carga	Tiempo ejecución	Gap	Pacientes atendidos	
I ₁	102753	102753	13,0	2,4	0,0%	23	102753	120248	1,4	3600,9	17,0%	23	0,0%
I ₂	133523	133676	35,9	3600,6	0,1%	31	116454	219278	2,3	3601,3	88,3%	31	12,8%
I ₃	133713	134595	44,4	3600,9	0,7%	32	111620	306308	3,4	3601,9	174,4%	32	16,5%
I ₄	133803	133803	17,0	2,2	0,0%	29	133803	183240	5,3	3602,7	36,9%	29	0,0%
I ₅	212219	212490	52,8	3601,1	0,1%	59	176150	399906	6,6	3604,2	127,0%	59	17,0%
I ₆	213438	214787	87,6	3601,6	0,6%	60	158086	537134	9,0	3605,3	239,8%	60	25,9%
I ₇	166802	166803	47,0	5,6	0,0%	32	162803	445962	20,8	3609,7	173,9%	31	2,4%
I ₈	372548	372548	172,5	2689,9	0,0%	84	247500	966937	22,6	3610,5	290,7%	81	33,6%
I ₉	477878	478357	207,4	3604,6	0,1%	113	264219	1285530	19,9	3608,4	386,5%	111	44,7%
I ₁₀	176801	176803	56,6	6,6	0,0%	29	174800	722564	33,2	3614,6	313,4%	32	1,1%
I ₁₁	452529	452549	155,9	317,6	0,0%	90	264339	1543440	36,8	3617,7	483,9%	79	41,6%
I ₁₂	639237	639397	257,0	3604,7	0,0%	134	311713	2079010	39,4	3619,5	567,0%	125	51,2%
I ₁₃	197801	197803	74,4	9,6	0,0%	32	184803	1101730	73,7	3632,9	496,2%	31	6,6%
I ₁₄	532536	532557	210,8	72,9	0,0%	94	256240	2252000	80,3	3637,9	778,9%	80	51,9%
I ₁₅	788392	792446	350,7	3606,3	0,5%	142	307293	2961020	87,8	3641,8	863,6%	129	61,0%
I ₁₆	212803	212803	159,4	36,0	0,0%	32	182798	2814010	294,1	3714,1	1439,4%	32	14,1%
I ₁₇	619508	619527	493,2	323,3	0,0%	96	239914	5508040	350,3	3755,8	2195,8%	75	61,3%
I ₁₈	1022376	1022378	758,1	579,9	0,0%	158	59152	7253010	336,3	3756,7	12161,6%	44	94,2%
Promedio	366034	366448	177,4	1625,9	0,1%	71	191913	1705520	79,1	3635,3	1157,5%	60	29,8%

Las Figuras 8 y 9 muestran los gráficos que comparan la cantidad de pacientes atendidos para cada instancia. El primero corresponde a los pacientes atendidos por la versión C de cada modelo considerando un puntaje de SPP de 40. Mientras, el segundo muestra las instancias que consideran un puntaje de SPP igual a 50. En rojo se destacan los pacientes atendidos en ILP-C y en azul aparecen los pacientes atendidos en CP-C. Se puede notar que, en ambos gráficos, la primera mitad de los pacientes atendidos coinciden en gran medida, pero desde la instancia I₁₂ en adelante, ILP-C consigue encontrar una distribución de cirugías que atiende más pacientes que CP-C. Por último, en las instancias más grandes ILP-C logra asignar más del triple de los pacientes que asigna CP-C a una cirugía, demostrando su superioridad en este ámbito.

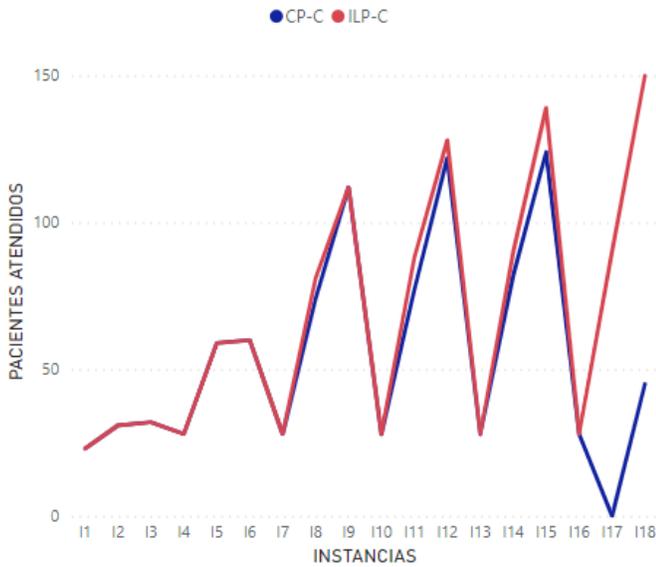


Figura 8: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento C – SPP-40.

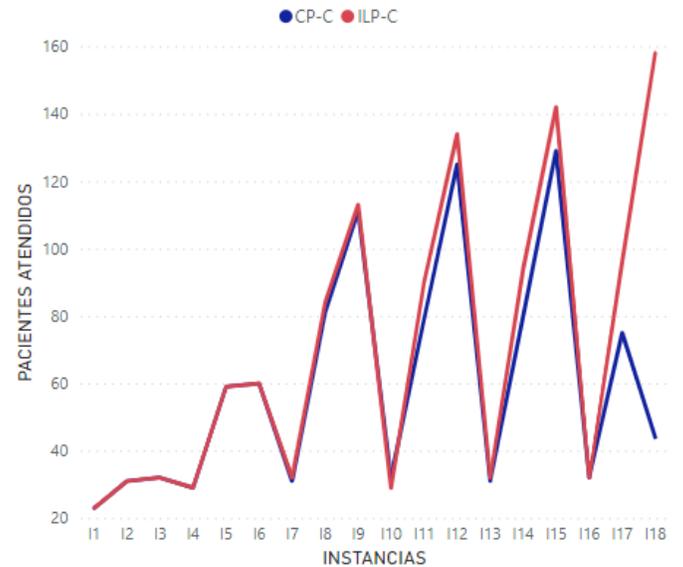


Figura 9: Cantidad de pacientes atendidos en el experimento C – SPP-50.

Las Figuras 10 y 11 comparan la RAM utilizada por los modelos resolviendo las instancias, con puntaje del SPP de 40 y 50, respectivamente. En rojo se destaca ILP-C, mientras que en azul aparecen los datos de CP-C. Se puede observar que el modelo de ILP ocupa mucha más memoria que el modelo CP en todas las ocasiones. Este último se mantiene prácticamente estable hasta la instancia I₁₆. Con SPP-40, el máximo de RAM usado por ILP-C es de 21,85 GB, una disminución del 75,2% respecto al usado por ILP-A, y el máximo de RAM usado por CP-C es de 7,0 GB, un incremento del 5,0% con respecto a CP-A. Por otro lado, considerando SPP-50, el máximo de RAM usado por ILP-C es de 17,6 GB, 80,0% menos que ILP-A, y CP-C se mantiene estable con un máximo de 7,0 GB.

Adicionalmente, se realiza un experimento que considera a ILP-C y CP-C con SPP-40 con distintos tiempos. En la Tabla 10 se presentan los resultados que muestran el valor del objetivo y el *gap* para ILP-C y CP-C con SPP-40. Ambos modelos consideran un tiempo límite de 60, 300 y 600 segundos.



Figura 10: RAM (GB) utilizada en el experimento C – SPP-40.



Figura 11: RAM (GB) utilizada en el experimento C – SPP-50.

El fin de este experimento es descubrir cuál modelo puede encontrar mejores soluciones en tiempos cortos. Se escoge un puntaje de 40 para el SPP debido a que, si bien con un puntaje de 50 el promedio de pacientes atendidos y el PRH aumentan ligeramente, también lo hacen sus desviaciones estándar. Mantener bajos los valores de las desviaciones estándar implica una repartición más equitativa de recursos y asignaciones, por lo que es deseable que estos valores se minimicen dentro de lo posible.

De la ejecución de 60 segundos, se extrae que CP-C puede asignar más pacientes en promedio en tiempos bajos, debido principalmente a que ILP-C no logra encontrar solución en varias instancias. Debido a que CP-C no logra encontrar soluciones factibles en las instancias más grandes, entonces, el *gap* de este modelo parece ser inferior al del modelo de ILP. Sin embargo, esto solo ocurre para el cálculo del promedio, ya que no encuentra soluciones, implicando técnicamente un *gap* de 0,0%. Mientras, en la ejecución de 600 segundos, ILP-C logra un *gap* de 613,0% en promedio, 10 veces menor que el de 300 segundos. Por último, CP-C muestra un *gap* de 5809,0%, casi cinco veces mayor que su alternativa de 300 segundos.

Tabla 10: Resultados de ejecutar ILP-C y CP-C con 60, 300 y 600 segundos.

Instancia	60 segundos				300 segundos				600 segundos			
	ILP		CP		ILP		CP		ILP		CP	
	FO	gap	FO	gap	FO	gap	FO	gap	FO	gap	FO	gap
I ₁	102815	0%	101815	30%	102815	0%	102815	21%	102815	0%	102815	21%
I ₂	117057	2%	115089	131%	117057	1%	117057	107%	117057	0%	117057	103%
I ₃	115218	4%	113285	208%	115240	0%	114305	178%	115240	0%	114305	173%
I ₄	133855	0%	125855	73%	133855	0%	127855	63%	133855	0%	127855	53%
I ₅	177674	5%	165716	161%	177687	0%	170728	154%	177687	0%	170728	138%
I ₆	173729	11%	149039	291%	176695	7%	156661	272%	175744	7%	159938	264%
I ₇	166855	0%	132853	274%	166855	0%	146855	238%	166855	0%	146855	238%
I ₈	256872	26%	162276	515%	261938	23%	203800	390%	266911	20%	223860	346%
I ₉	-8400	4880%	56329	2256%	281065	36%	153146	766%	292132	30%	191428	593%
I ₁₀	176855	0%	115800	575%	176855	0%	143852	444%	176855	0%	153855	408%
I ₁₁	-3200	12493%	33239	4617%	300970	32%	173265	805%	301951	31%	197627	693%
I ₁₂	-8400	7054%	32153	6366%	363466	38%	117027	1677%	363466	37%	140319	1382%
I ₁₃	197855	0%	60724	1772%	197855	0%	139847	713%	197855	0%	155850	630%
I ₁₄	-3200	15657%	3903	57599%	351931	32%	126726	1677%	353931	31%	230524	877%
I ₁₅	-8400	36174%	-8400	35350%	-8400	7906%	18956	15520%	427525	44%	73475	3930%
I ₁₆	212855	0%	-	-	212855	0%	-	-	212855	0%	113790	2373%
I ₁₇	-3200	181555%	-	-	-3200	17990%	-	-	388931	47%	-	-
I ₁₈	-8400	91590%	-	-	-8400	91590%	-	-	472492	10779%	-8392	86528%
Promedio	99358	19414%	90645	7348%	173174	6536%	134193	1535%	246897	613%	141875	5809%

4.3.4 Comparación del rendimiento

Al comparar los modelos se busca encontrar respuesta a la interrogante de cuál de los modelos propuestos entrega mejores resultados al problema de la asignación de cirugías y bajo qué condiciones lo hace.

El primer criterio de comparación entre los modelos es la calidad de las soluciones. Para medir esto se puede utilizar el *gap*, el valor porcentual que mide la diferencia entre la función objetivo encontrada por el modelo y el *upper bound*. Un *gap* de 0% significa que el valor encontrado para la función objetivo es igual al *upper bound*, y por lo tanto, se garantiza la optimalidad. En la Figura 12 se puede apreciar que las versiones A, B y C del modelo CP tienen *gaps* sumamente elevados. Por otro lado, los *gaps* del modelo ILP son más cercanos a 0 en las tres versiones. Sin embargo, si se revisa la sección de experimentos, es posible notar que los resultados obtenidos por el modelo de CP en muchos casos son el mismo que fue obtenido por ILP. Esto significa que ILP logra demostrar la optimalidad de la

solución de manera mucho más fácil que CP, probablemente debido a que el *solver* de CP utiliza técnicas de búsqueda en extensión que dificulta reducir el *gap* a 0,0%.

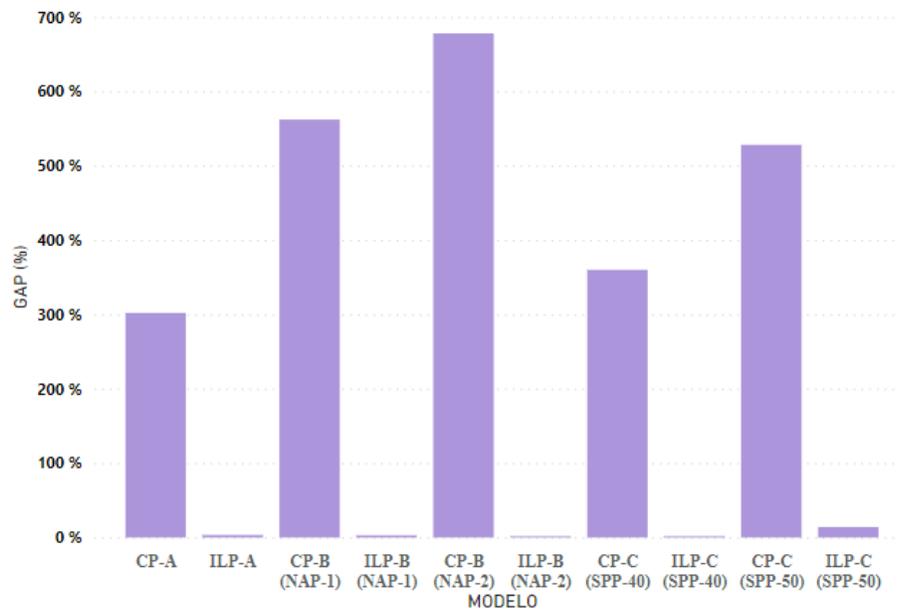


Figura 12: Comparación de *gap* entre modelos.

Otro criterio para comparar ambos modelos es en el uso de memoria. En las Figuras 3, 6, 7, 10 y 11 puede verse la variación de memoria utilizada para resolver cada instancia. Mientras, en la Figura 13 se aprecia el panorama completo al comparar todas las versiones.

En las versiones B, tanto el modelo de CP como el modelo de ILP utilizan cantidades muy bajas de RAM. Sin embargo, el uso aumenta drásticamente al momento de ejecutar las versiones C, ya que en promedio CP necesita casi 2 GB mientras que ILP requiere alrededor de 8,0 GB. Es claro ver que CP, en términos de requerimientos de memoria, es muy superior, dada su baja cantidad de memoria requerida. Estas son cantidades de memoria habitual en un computador personal. Es interesante notar que considerar las restricciones de afinidad y preferencias, e incluso implementar el SPP, disminuye el uso de memoria.

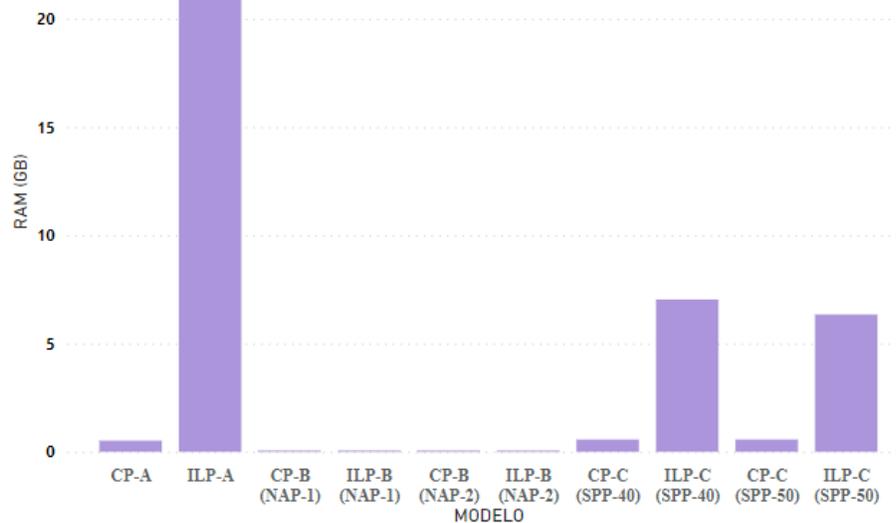


Figura 13: Comparación de memoria usada (en GB) entre modelos.

La Figura 14 muestra una comparación de los tiempos de resolución promedio empleados por los modelos para resolver las instancias. Este tiempo de resolución no considera el tiempo necesario para construir los modelos para cada instancia. Los modelos de CP promedian la hora completa de ejecución debido a lo mencionado anteriormente: los modelos de CP no están enfocados en demostrar la optimalidad de la solución. Por tanto, utiliza los 3600 segundos para encontrar mejores soluciones factibles. Por otro lado, el modelo de ILP es mucho más rápido en la búsqueda de soluciones. No solo es igual de eficiente que el modelo de CP para encontrar una buena solución factible en tiempos rápidos, sino que también es mucho mejor para demostrar la optimalidad de la solución.

Por último, la Tabla 11 muestra una comparación entre el modelo de ILP y el modelo de CP. El símbolo “✓” representa que un modelo entrega mejores resultados que el otro. ILP muestra ser superior en términos de *gap* y tiempos de resolución. Mientras, CP solo llega a ser mejor en el uso de la RAM.

Tabla 11: Comparación de modelos por *gap*, RAM y tiempos de resolución.

Modelo	<i>Gap</i>	RAM	Tiempos de resolución
ILP	✓		✓
CP		✓	

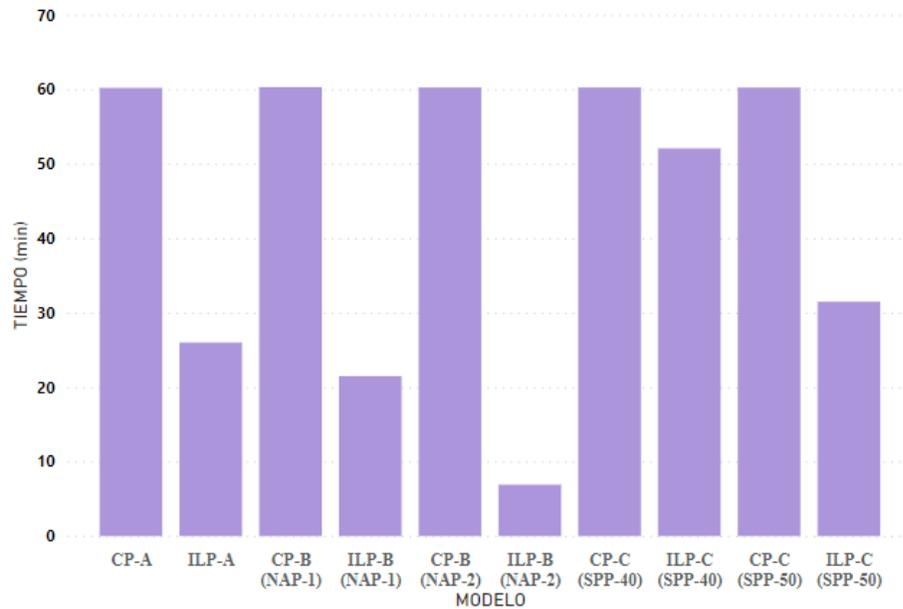


Figura 14: Comparación de tiempos de resolución entre modelos.

4.4 Discusión de los factores de relación humana

En esta sección se discuten y comparan los resultados de los experimentos A, B y C basado en los factores de relación humana. Para ello se definen tres métricas: el número de pacientes atendidos, la calidad de los equipos quirúrgicos y el número de cirugías asignadas por cirujano.

La cantidad de pacientes atendidos es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en los problemas de asignación de cirugías. Es ideal asignar la mayor cantidad de pacientes con una alta prioridad en el horizonte de planificación. Por tanto, se busca que este número no disminuya significativamente al considerar las afinidades y preferencias.

Por otro lado, para determinar la calidad de los equipos quirúrgicos formados, se pueden comparar los promedios del puntaje de relación humana (PRH) obtenidos para cada cirujano principal. Es importante recordar que este valor es obtenido al sumar la afinidad del cirujano principal con cada integrante del equipo quirúrgico y las preferencias del cirujano principal por los recursos asignados en cada cirugía realizada. Así, valores más altos de PRH indican que se forman mejores equipos quirúrgicos, ya que se están considerando relaciones humanas más fuertes. Por otro lado, desviaciones estándar del PRH más altas indican que hay una mayor diferencia de cirugías realizadas entre los distintos cirujanos, es decir, hay un desbalance en el reparto de las cirugías asignadas. Por esto, lo

ideal es conseguir un promedio de PRH más alto y que, a la vez, la desviación estándar se mantenga baja.

Finalmente, también se puede medir la calidad de los equipos formados en base a cuántas cirugías le corresponde hacer a cada cirujano. Lo ideal es que el total de cirugías a realizar se distribuya de forma balanceada entre todos los cirujanos disponibles. Por tanto, se busca obtener desviaciones estándar bajas y a la vez asignar la mayor cantidad de cirugías posibles (lo cual implica darle atención a más pacientes).

4.4.1 Análisis del modelo de ILP

En la Tabla 12 se resume los promedios de pacientes según la versión de ILP, mientras que la Figura 15 grafica esta información. La línea naranja marca la cantidad de pacientes atendidos por ILP-A.

Tabla 12: Resumen de los promedios de pacientes atendidos - ILP.

Experimento A	Experimento B		Experimento C	
	NAP-1	NAP-2	SPP-40	SPP-50
62	37	27	68	71

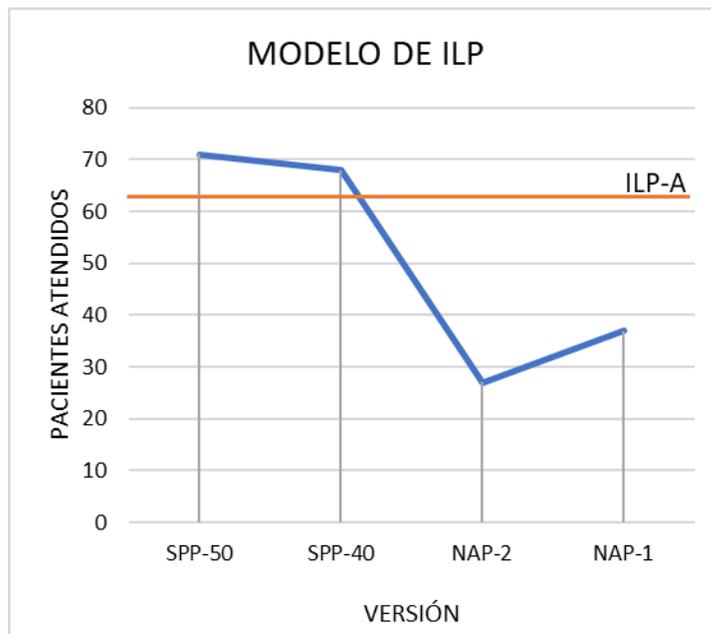


Figura 15: Comparación de pacientes atendidos – ILP.

Es interesante mencionar la situación de la versión A del modelo de ILP, que no considera ni afinidad ni preferencias, promedia un número de pacientes inferior a las versiones ILP-C con un puntaje del SPP-40 y SPP-50. Resulta contraintuitivo ya que, al no existir restricciones adicionales, la versión A debería tener la mayor cantidad de pacientes atendidos. Sin embargo, esto se debe a que hay instancias en las que el ILP-A no logra encontrar soluciones factibles, entonces, su número de pacientes atendidos es 0, disminuyendo el promedio. ILP-C, por otro lado, sí logra encontrar una solución, aumentando su promedio de pacientes atendidos. Esto puede deberse a que el espacio de búsqueda es distinto entre ambas versiones, y es más fácil encontrar una solución para esas instancias con el SPP. Para realizar una comparación justa, se excluyen todas las instancias en que ambos modelos y sus versiones no encuentran una solución factible. Así, la Tabla 13 muestra el resumen de los promedios de pacientes limitados a las instancias entre I_1 e I_{16} . La Figura 16 grafica la cantidad de pacientes atendidos en promedio por cada modelo y versión.

Tabla 13: Resumen de los promedios de pacientes atendidos (I_1 - I_{16}) - ILP.

Experimento A	Experimento B		Experimento C	
	NAP-1	NAP-2	SPP-40	SPP-50
64	34	25	62	64

En definitiva, ILP-A atiende 3,0% más pacientes que ILP-C con SPP-40, 46,8% más pacientes que ILP-B con NAP-1 y 60,9% más pacientes que ILP-B con NAP-2. La diferencia entre ILP-A e ILP-C con SPP-50 es de 0,0%, lo que quiere decir que considerar el SPP-50 no tiene impacto en la asignación de pacientes. A partir de este análisis, todas las secciones posteriores consideran solo a las instancias I_1 - I_{16} .

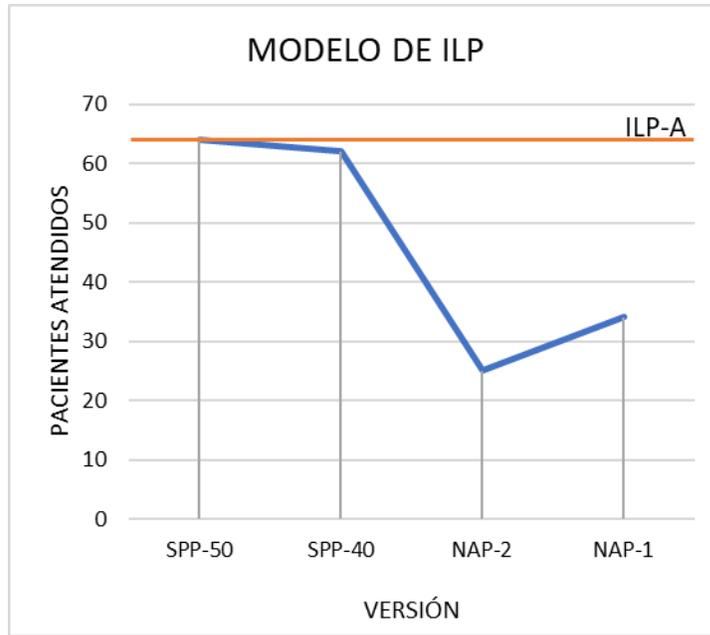


Figura 16: Comparación de pacientes atendidos (I₁-I₁₆) – ILP.

La Tabla 14 resume los promedios del PRH por cirujano y sus desviaciones estándar por versión del modelo de ILP. La Figura 17 muestra un gráfico de barras con sus barras de desviación, mostrando el promedio de PRH por cirujano y su desviación estándar. Los resultados obtenidos en el experimento B muestran bajos PRH, pero en el experimento C se puede ver que el modelo de ILP con SPP-40 muestra equipos con relación humana 8,8% mejor que la versión A, mientras que el modelo de ILP con SPP-50 presenta equipos con relación humana 19,6% mejor que la versión A. En promedio, ILP-C genera equipos 14,2% mejores que ILP-A, en términos de PRH. Además, si bien el promedio de PRH de CP-C con SPP-50 es 9,0% mejor que el de SPP-40, su desviación estándar es 27,1% más alta.

Tabla 14: Resumen de promedios y desv. estándar de PRH por cirujano - ILP.

Experimento A		Experimento B				Experimento C			
		NAP-1		NAP-2		SPP-40		SPP-50	
Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.
61,2	30,3	44,3	60,0	33,8	42,2	66,6	27,2	73,2	37,3

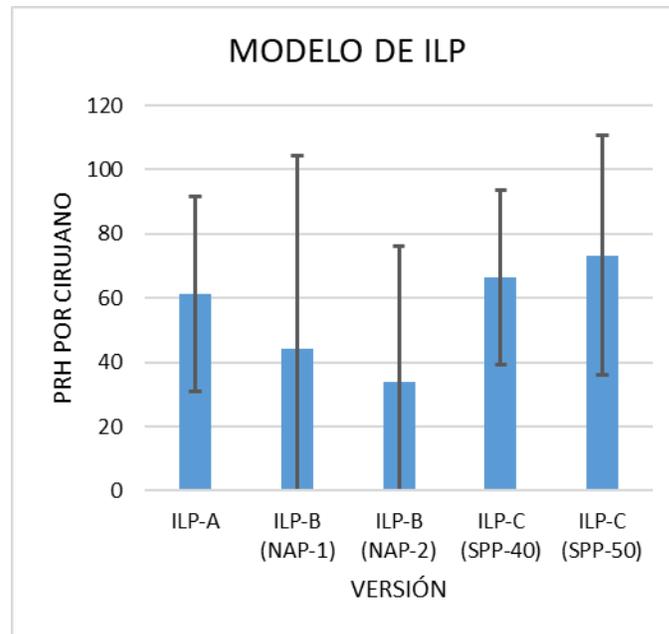


Figura 17: Promedio y desv. estándar de PRH por cirujano – ILP.

La Tabla 15 resume los datos del promedio y la desviación estándar del número de cirugías por cirujano. La Figura 18 muestra un gráfico de barras con sus cajas de desviación. ILP-C con SPP-50 empata con ILP-A como modelo con más cirugías por cirujano, pero la desviación estándar del primero es más elevada. Mientras, ILP-C con puntaje diario del SPP de 40 puntos disminuye en un 4,7% la cantidad de cirugías en promedio asignadas a cada cirujano con respecto a su versión de SPP-50, pero su desviación estándar es menor en un 16,7%.

Por otro lado, la versión B del modelo de ILP tiene un desempeño deficiente. ILP-B con NAP-1 disminuye el número promedio de cirugías por cirujano en un 46,9%, e incrementa la desviación estándar en un 21,9% con respecto a ILP-A. ILP-B con NAP-2 disminuye el número promedio de cirugías por cirujano en un 61%, y aumenta la desviación en un 3% con respecto a ILP-A.

Tabla 15: Resumen de promedios y desv. estándar de cirugías por cirujano - ILP.

Experimento A		Experimento B				Experimento C			
		NAP-1		NAP-2		SPP-40		SPP-50	
Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.
6,4	3,2	3,4	3,9	2,5	3,3	6,1	3,0	6,4	3,6

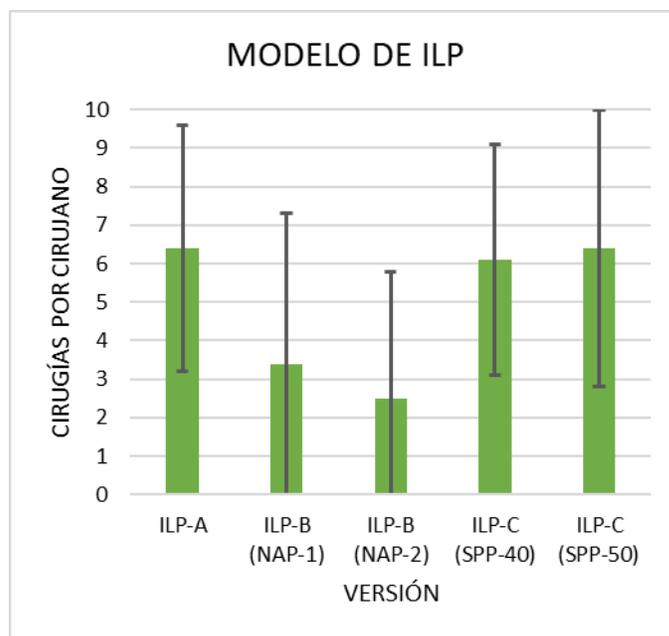


Figura 18: Promedio y desv. estándar de cirugías por cirujano – ILP.

En resumen, se puede concluir que la versión B del modelo de ILP no entrega buenos resultados. La disminución de pacientes atendidos, promedios de PRH y cirugías por cirujano no es justificación suficiente para asegurar un nivel mínimo de afinidad y preferencias. De hecho, ILP-C forma mejores equipos quirúrgicos (en términos de PRH y asignación de cirugías por cirujano) sin perjudicar el número de pacientes atendidos.

Al comparar la versión A con la versión C del modelo de ILP, se observa que la inclusión del SPP no parece ser muy relevante. Sin embargo, esto en realidad se debe al bajo número de cirujanos que se están considerando en los experimentos, solo 10 cirujanos, que se reparten entre seis especialidades. Así, parece ser que el número de cirujanos considerados es un número demasiado bajo para observar diferencias en la cantidad de cirugías asignadas. Esto es debido a que los modelos no tienen muchas alternativas de asignación de cirujanos puesto que a lo más hay dos cirujanos de cada especialidad disponibles. De hecho, los números bajos del promedio de cirugías por cirujano en la versión B se deben principalmente a que el número de pacientes atendidos es menor, y por lo tanto, hay menos cirugías asignadas por cirujano.

Teniendo esto en cuenta, el SPP permite asignar las cirugías de manera más equitativa mientras mayor sea el número de cirujanos disponibles. Por lo tanto, el SPP se beneficia más a medida que crece el

plantel. Sin embargo, es importante tomar en consideración que incrementar el número de cirujanos aumenta significativamente el costo computacional de resolver el problema.

4.4.2 Análisis del modelo de CP

Los factores a considerar para el análisis del modelo de CP son los mismos que los considerados en el análisis del modelo de ILP. Las instancias consideradas van desde I₁ hasta I₁₆, puesto que estas son las instancias en que ambos modelos, en todas sus versiones, lograron encontrar soluciones factibles.

Tabla 16: Resumen de los promedios de pacientes atendidos - CP.

Experimento A	Experimento B		Experimento C	
	NAP-1	NAP-2	SPP-40	SPP-50
60	33	24	59	60

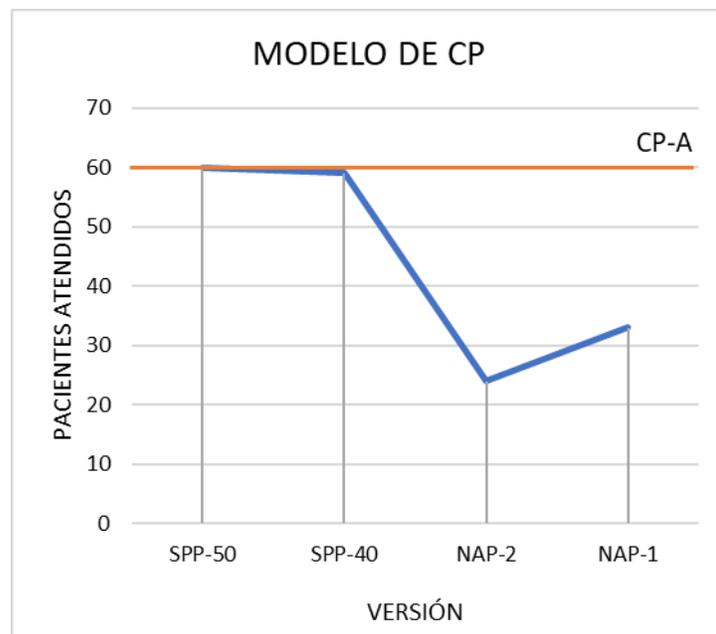


Figura 19: Comparación de pacientes atendidos – CP.

En la Tabla 16 se resumen los promedios de pacientes según la versión del modelo, mientras que la Figura 19 grafica esta información. La línea naranja marca la cantidad de pacientes atendidos por el modelo CP-A. Puede verse que CP-A atiende 1,7% más pacientes que CP-C con SPP-40, 45,0% más pacientes que CP-B con NAP-1 y 60,0% más pacientes que CP-B con NAP-2. La diferencia entre CP-A y CP-C con SPP-50 es de 0,0%. Por tanto, CP con SPP-50 atiende la misma cantidad de pacientes

que CP-A. Esto quiere decir que CP-C tiene el potencial de incrementar los puntajes de relación humana sin perjuicio del número de pacientes asignados a una cirugía.

La Tabla 17 muestra los resultados del nivel de PRH promedio por cirujano, mientras que la Figura 20 grafica esta información. CP-C con SPP-50 obtiene mejoras del 13,5%, y CP-C con SPP-40 obtiene mejoras del 5,1% respecto a CP-A. En promedio, CP-C mejora en un 9,3% la calidad del equipo quirúrgico de CP-A con respecto a los factores de relación humana. Por otro lado, CP-B con NAP-1 y CP-B con NAP-2 disminuyen el promedio de PRH en un 26,4% y en un 42,1%, respectivamente.

Tabla 17: Resumen de promedios y desv. estándar de PRH por cirujano - CP.

Experimento A		Experimento B				Experimento C			
		NAP-1		NAP-2		SPP-40		SPP-50	
Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.
59,2	177,6	43,6	130,8	34,3	103,0	62,2	26,9	67,2	34,8

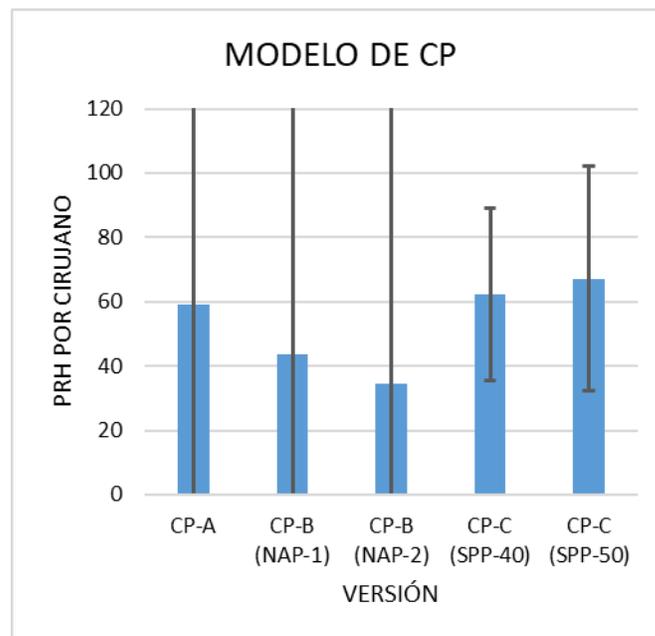


Figura 20: Promedio y desv. estándar de PRH por cirujano – CP.

Además, la desviación estándar de CP-B con NAP-1 y con NAP-2 disminuye en un 26,4% y en un 42,0%, respectivamente. Las mejoras son aún más grandes para CP-C con SPP-40 y SPP-50, ya que disminuyen la desviación estándar de CP-A en un 84,9% y en un 80,4% de manera respectiva.

La Tabla 18 resume los datos del promedio y la desviación estándar del número de cirugías por cirujano para el modelo de CP. La Figura 21 muestra un gráfico de barras con sus cajas de desviación.

Tabla 18: Resumen de promedios y desv. estándar de cirugías por cirujano – CP.

Experimento A		Experimento B				Experimento C			
		NAP-1		NAP-2		SPP-40		SPP-50	
Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.
6,0	3,7	3,3	3,9	2,4	3,2	5,9	2,9	6,4	3,3

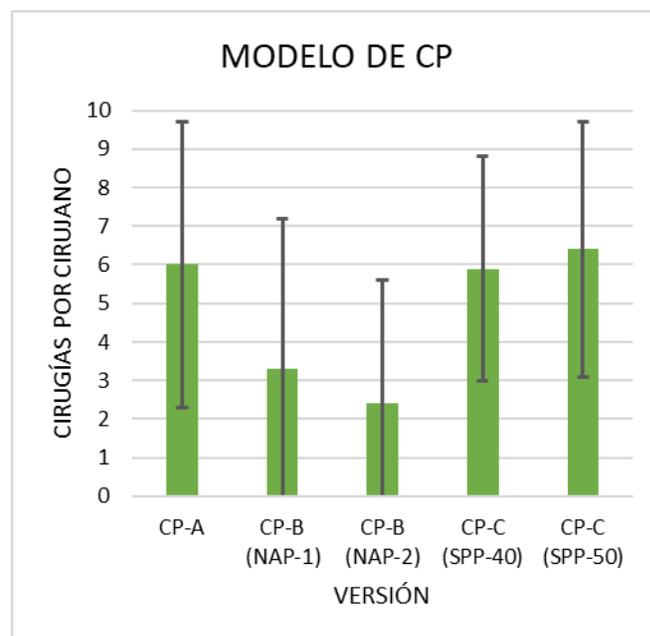


Figura 21: Promedio y desv. estándar de cirugías por cirujano – CP.

Puede verse que CP-C con SPP-40 asigna un 8,5% menos cirugías a cada cirujano que CP-C con SPP-50, pero también presenta desviaciones estándar que, en promedio, son 12,1% menores. Además, CP-C con SPP-50 mejora los resultados de CP-A, ya que su promedio de cirugías por cirujano es 6,3% más alto, y su desviación estándar es 10,8% menor. CP-B con NAP-1 disminuye el promedio en un 45,0%, y aumenta la desviación estándar en un 5,4% con respecto a CP-A. Finalmente, CP-B con NAP-2 disminuye el promedio en un 6,00%, pero también disminuye la desviación estándar en un 13,5%.

En conclusión, a diferencia de ILP-A, la desviación estándar en el promedio de PRH por cirujano para CP-A son muy elevadas, por lo que la disminución de las versiones B y C son mucho más

significativas en magnitud. Además, la versión B de CP no entrega buenos resultados, de forma similar a ILP-B. Sin embargo, CP-C con SPP-50 forma mejores equipos quirúrgicos sin disminuir el número de pacientes atendidos. CP-C con SPP-40 disminuye ligeramente la cantidad de pacientes atendidos, pero a cambio forma equipos quirúrgicos más equitativos que CP-C con SPP-50.

La Tabla 19 muestra la comparación de los modelos según las métricas definidas para esta sección. En combinación con la información presentada en la Tabla 11, se puede concluir que el modelo de ILP-C es el mejor modelo para trabajar con el problema de la planificación de cirugías considerando los factores de relación humana, afinidad y preferencias.

Tabla 19: Comparación de modelos por promedio de pacientes, PRH y cirugías.

Modelo	Pacientes atendidos	Promedio de PRH	Promedio de cirugías
ILP	✓	✓	✓
CP			

Finalmente, la Tabla 20 muestra un resumen de los resultados de la investigación.

Tabla 20: Resumen de los resultados.

MODELO	DESCRIPCIÓN	RESULTADOS					
		Pacientes atendidos	PRH	Cirugías por cirujano	Gap (%)	RAM (GB)	Tiempo (minutos)
ILP-A	Versión de ILP que no considera los factores de relación humana.	64	61,2 ± 30,3	6,4 ± 3,2	3,4	22,2	26,0
ILP-B	Versión de ILP que considera los factores de RH modelados como restricciones.	30	39,1 ± 51,1	3,0 ± 3,6	1,6	0,03	14,1
ILP-C	Versión de ILP que considera los factores de RH modelados como parte de la función objetivo.	63	70,0 ± 32,2	6,3 ± 3,3	7,5	6,7	41,7
CP-A	Versión de CP que no considera los factores de relación humana.	60	59,2 ± 177,6	6,0 ± 3,7	302,0	0,5	60,0
CP-B	Versión de CP que considera los factores de RH modelados como restricciones.	29	39,0 ± 130,4	2,9 ± 3,6	620,0	0,0005	60,0
CP-C	Versión de CP que considera los factores de RH modelados como parte de la función objetivo.	60	64,7 ± 30,9	6,2 ± 3,1	444,0	0,6	60,0

5 CONCLUSIONES

El estudio realizado en esta memoria de título aborda la planificación de cirugías electivas, centrandose en aspectos como la asignación de recursos, el tamaño de la lista de espera, la prioridad de los pacientes y la compatibilidad entre los miembros de un equipo quirúrgico. Para ello, se proponen un modelo de programación lineal entera (ILP) y un modelo de programación con restricciones (CP), cumpliendo con el objetivo principal de esta memoria de título. Estos modelos sirven como instrumentos auxiliares para quienes toman decisiones en el sector hospitalario, en específico en el área de cirugías, para que pueda gestionar de manera eficaz la lista de espera, los profesionales médicos y los servicios a la comunidad.

El diseño de optimización propuesto ofrece una planificación de intervenciones quirúrgicas que prioriza a los pacientes que aguardan por un procedimiento quirúrgico de especialidad. Es importante mencionar que, en muchos hospitales de Chile, este proceso de planificación se lleva a cabo manualmente (Becerra, 2021).

Tres experimentos son realizados para analizar el comportamiento de los modelos al considerar los factores de relación humana en el equipo. Los resultados indican que, entre las tres versiones consideradas para los modelos de ILP y CP, la versión B (que considera los factores de relación humana como restricciones de los modelos) entrega los resultados más deficientes. En promedio, ambas versiones de ILP-B atienden 48,4% menos pacientes, forman equipos quirúrgicos con 39,1% menos PRH y asignan 53,1% menos cirugías a los cirujanos que ILP-A. Por su parte, ambas versiones de CP-B atienden 51,7% menos pacientes, forman equipos quirúrgicos con 34,1% menos PRH y asignan 52,5% menos cirugías a los cirujanos que CP-A.

Por otro lado, la versión C de los modelos presenta mejoras frente a los resultados de la versión A. Aunque ambas versiones de ILP-C atienden en promedio 1,6% menos pacientes, forman equipos quirúrgicos con 12,6% más PRH. Aun así, asignan 2,3% menos cirugías a los cirujanos que ILP-A. Sin embargo, esto es debido a que la cantidad de cirujanos considerados es muy baja, y se insta a la experimentación con un número más elevado de profesionales. Por su parte, ambas versiones de CP-C atienden tan solo 0,8% menos pacientes, pero forman equipos quirúrgicos con 8,5% más PRH y asignan 2,4% más cirugías a los cirujanos que CP-A.

Los resultados demuestran que, si bien considerar la afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico tiene un alto costo computacional en los modelos, se obtienen planificaciones de cirugías de buena calidad y que pueden generar un mejor ambiente laboral al momento de operar a los pacientes. Al tener en cuenta la compatibilidad en los equipos de cirugía, el problema se acerca más a la realidad, tal y como sugiere Driver et al (1998), y se espera que su implementación en entornos reales tenga un impacto positivo, mejorando las relaciones, el tiempo en los procesos quirúrgicos y minimizando los errores humanos.

Respecto a los modelos y versiones propuestos, es sensato determinar que la versión C es la mejor alternativa para asignar equipos quirúrgicos de buen nivel. La versión B, si bien asegura buenos equipos quirúrgicos por sobre un cierto nivel de afinidad y preferencias, a menudo lo hace a costa de atender menos pacientes, que es el objetivo primordial del problema de asignación de cirugías. Esto se hace más evidente a medida que se agregan más integrantes al equipo o más recursos sujetos a ser preferidos por los cirujanos. Sin embargo, la versión C muestra resultados incluso mejores que la versión B, a pesar de no tener restricciones de afinidad y preferencias que garanticen un cierto nivel aceptable. Además, los resultados de la versión C muestra números similares a los de la versión A en términos de asignaciones de cirugías, y a la vez, incrementa la calidad de los equipos formados. Sin embargo, la cantidad de cirugías asignadas a cada cirujano no presenta variaciones significativas. Estos valores están sujetos al bajo número de cirujanos considerados en este estudio, y se piensa que incrementando esta cantidad se pueden ver diferencias más notables. Sin embargo, es importante destacar que incrementar la cantidad de cirujanos considerados también aumenta el costo computacional de resolver el problema.

Por último, se concluye que el modelo CP es capaz de encontrar buenas soluciones rápidamente, pero tiene dificultades para demostrar la optimalidad. Sin embargo, utiliza muchos menos recursos computacionales que el modelo ILP. Mientras, ILP demuestra ser más efectivo al momento de encontrar buenas soluciones, y debería ser escogido por los hospitales que buscan mejorar las condiciones de compatibilidad en el equipo quirúrgico siempre y cuando posean equipos computacionales lo suficientemente poderosos.

Es importante destacar algunas limitaciones de los modelos propuestos. Los resultados obtenidos están sujetos a condiciones específicas y a un contexto principalmente chileno. Otros hospitales de otros países podrían tener condiciones y contextos distintos que podrían implicar una manera distinta de modelar este problema de asignación de cirugías. Además, los modelos fueron ejecutados

únicamente con CPLEX, por lo que otros *solver* para modelos de ILP y CP podrían mejorar los resultados para cada modelo. Otra limitación viene dada por los supuestos considerados, en particular el supuesto número 11 (que dice que no se consideran atrasos en las cirugías). En la realidad, es un acontecimiento común que las cirugías se atrasen, por lo que implementar un modelo de programación estocástica, incorporando la incertidumbre en la duración de las cirugías, puede ser una respuesta a esta limitación.

Como trabajo futuro, se sugiere mejorar los modelos presentados, incorporando nuevos elementos que permitan modelar la realidad hospitalaria de forma más fiel. Por ejemplo, se puede modificar el planteamiento del problema para diferenciar aún más el concepto de afinidad con las preferencias. También se podrían agregar restricciones que puedan acelerar la búsqueda de soluciones, ayudando a reducir la brecha teórica y práctica.

Por otra parte, los resultados mostrados en esta memoria de título pueden ser validados si se contrastan con las asignaciones hechas de forma manual en un hospital o clínica. Sin embargo, no se cuenta con la información de calendarios de asignaciones del hospital de donde provienen los datos. Así, otro posible trabajo futuro es comparar el desempeño del modelo frente a planificaciones manuales.

Es importante también hacer experimentos considerando un número más alto de cirujanos. Como se dijo anteriormente, incrementar este número puede permitir distinguir una mayor diferencia a favor de la versión C de los modelos por sobre la versión A.

Otra mejora puede consistir en modelar matemáticamente el proceso para determinar la cantidad de puntaje óptima a asignar en el SPP. Actualmente es obtenida de forma experimental, pero puede ser posible implementar una fórmula que permita conocer este valor a partir de datos como el número de cirujanos, el número de quirófanos, el tamaño del horizonte de planificación, etc. Además, se puede abordar el problema de la asignación de cirugías teniendo en cuenta los factores de relación humana considerando un enfoque multiobjetivo en lugar de uno de un solo objetivo. Finalmente, otro posible trabajo futuro consiste en proponer nuevas alternativas para resolver de manera más eficiente este problema, tales como metaheurísticas, con el fin de obtener buenos resultados en términos de pacientes atendidos y calidad del equipo quirúrgico en tiempos rápidos.

6 GLOSARIO

Afinidad: factor de relación humana que se refiere a un sentimiento de cercanía, similitud o conexión entre dos o más personas. En un contexto médico o de equipo, podría referirse a la compatibilidad o la eficacia del trabajo en equipo entre los miembros del equipo quirúrgico.

Cirugías: son procedimientos médicos que implican la manipulación física de tejidos o estructuras corporales con el fin de diagnosticar, prevenir o tratar una enfermedad, lesión u otra condición.

Cirujano: médico que está especializado en realizar cirugías. Las cirugías pueden involucrar una amplia gama de procedimientos, desde pequeñas intervenciones ambulatorias hasta operaciones complejas y de alta tecnología. Los cirujanos suelen estar especializados en ciertas áreas, como la neurocirugía, la cirugía cardíaca, la cirugía ortopédica, etc.

CPLEX: software de optimización desarrollado por IBM. Es conocido por su capacidad para resolver problemas de programación lineal, programación lineal entera mixta y programación cuadrática.

Equipo quirúrgico: grupo de profesionales de la salud que trabajan juntos para llevar a cabo una operación quirúrgica. Esto puede incluir a cirujanos, anestesiólogos, enfermeras de quirófano, técnicos quirúrgicos y otros profesionales médicos.

Función objetivo: es la función que se está intentando maximizar o minimizar. Esta función suele estar sujeta a un conjunto de restricciones que limitan el conjunto de soluciones posibles.

Gap: brecha porcentual entre el mejor límite superior y el mejor límite inferior encontrado al final del proceso de resolución.

Horizonte de planificación: período de tiempo futuro durante el cual se anticipan y planean las acciones o decisiones. En la planificación de cirugías, se refiere a la ventana de tiempo en la cual se pueden realizar asignaciones.

Modelo de CP (programación con restricciones): es un paradigma de programación y modelación donde las relaciones entre las variables se expresan en forma de restricciones. Los problemas de CP se definen como un conjunto de objetos cuyos estados deben satisfacer una serie de restricciones o condiciones.

Modelo de ILP (programación lineal entera): es una técnica de optimización que busca la solución óptima dentro de un conjunto de soluciones factibles definido por restricciones lineales, donde algunas o todas las variables de decisión deben tomar valores enteros (números enteros).

Pacientes electivos: son aquellos pacientes que tienen programada una intervención, operación o tratamiento médico con anticipación. Normalmente, este tipo de atención médica no es urgente y puede ser programada con semanas o meses de antelación. Las situaciones electivas a menudo incluyen cirugías programadas, exámenes de diagnóstico o procedimientos terapéuticos que no son de emergencia.

Pacientes no electivos: son aquellos pacientes que necesitan atención médica inmediata o urgente. Estos pacientes no han programado su tratamiento con anticipación. En su lugar, la necesidad de atención médica surge repentinamente debido a una enfermedad aguda, una lesión o una complicación de una condición médica existente. Las situaciones no electivas pueden variar desde visitas inesperadas a la sala de urgencias hasta hospitalizaciones y cirugías de emergencia.

Preferencias: factor de relación humana que se refiere a la inclinación o elección de un individuo hacia una opción sobre otra. Pueden basarse en una variedad de factores, incluyendo (pero no limitado) a gustos personales, experiencias pasadas, objetivos personales y valores.

Prioridad: en un contexto hospitalario, se refiere al grado de importancia de una operación en relación con otras.

Python: lenguaje de programación interpretado de alto nivel con una filosofía de diseño que enfatiza la legibilidad del código.

Quirófano: también conocido como sala de operaciones, es un ambiente estéril dentro de un hospital donde los cirujanos y otros profesionales de la salud realizan procedimientos quirúrgicos.

Restricción: es una limitación o condición que las soluciones deben cumplir. Las restricciones definen el conjunto de soluciones factibles en un problema de optimización.

Variable: símbolo que representa un valor desconocido o que puede cambiar. En matemáticas y programación, las variables son usadas para representar números, cantidades, o información que puede cambiar o ser modificada en el transcurso de un cálculo o proceso. En un problema de optimización, las variables representan las decisiones que se pueden tomar.

7 REFERENCIAS

- Abdalkareem, Z. A., Amir, A., Al-Betar, M. A., Ekhan, P., & Hammouri, A. I. (2021). Healthcare scheduling in optimization context: A review. *Health and Technology*, 11(3), 445-469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12553-021-00547-5>
- Ahmed, A., & Ali, H. (2020). Modeling patient preference in an operating room scheduling problem. *Operations Research for Health Care*, 25, 100257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2020.100257>
- Apt, K. (2003). *Principles of constraint programming*. Cambridge university press. Cambridge, Reino Unido.
- Bargetto, R., Garaix, T., & Xie, X. (2023). A branch-and-price-and-cut algorithm for operating room scheduling under human resource constraints. *Computers & Operations Research*, 152, 106136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106136>
- Barrera, J., Carrasco, R. A., Mondschein, S., Canessa, G., & Rojas-Zalazar, D. (2020). Operating room scheduling under waiting time constraints: The Chilean GES plan. *Annals of Operations Research*, 286(1), 501-527. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3008-7>
- Becerra, P. (2021). *Programando Cirugías Electivas para un Hospital Público de Chile con afinidad en equipos quirúrgicos y capacidad de unidades UCI*. Tesis de Magíster, Universidad de Concepción.
- Breuer, D. J., Lahrichi, N., Clark, D. E., & Benneyan, J. C. (2020). Robust combined operating room planning and personnel scheduling under uncertainty. *Operations Research for Health Care*, 27, 100276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2020.100276>
- Cardoen, B., Demeulemeester, E., & Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 921-932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.04.011>
- Chan, W. T., & Hu, H. (2002). Constraint Programming Approach to Precast Production Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(6), 513-521. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:6\(513\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(513))

- Di Martinelly, C., & Meskens, N. (2017). A bi-objective integrated approach to building surgical teams and nurse schedule rosters to maximise surgical team affinities and minimise nurses' idle time. *International Journal of Production Economics*, 191, 323-334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.05.014>
- Dios, M., Molina-Pariente, J. M., Fernandez-Viagas, V., Andrade-Pineda, J. L., & Framinan, J. M. (2015). A Decision Support System for Operating Room scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 430-443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.08.001>
- Driver, M. J., Brousseau, K. R., & Hunsaker, P. L. (1998). *The Dynamic Decision Maker: Five Decision Styles for Executive and Business Success*. iUniverse. Estados Unidos.
- Hadorn, D. C., & Holmes, A. C. (1997). The New Zealand priority criteria project. Part 1: Overview. *BMJ*, 314(7074), 131. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7074.131>
- Hamid, M., Nasiri, M. M., Werner, F., Sheikahmadi, F., & Zhalechian, M. (2019). Operating room scheduling by considering the decision-making styles of surgical team members: A comprehensive approach. *Computers & Operations Research*, 108, 166-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.04.010>
- Latorre-Núñez, G., Lüer-Villagra, A., Marianov, V., Obreque, C., Ramis, F., & Neriz, L. (2016). Scheduling operating rooms with consideration of all resources, post anesthesia beds and emergency surgeries. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 248-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.016>
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*. Estados Unidos.
- Londoño, M. A., Orejuela, J. P., & Gil, C. A. (2020). Programación de Cirugías Multi-Objetivo considerando niveles de prioridad. *Revista ESPACIOS*, 41(03). <https://www.revistaespacios.com/a20v41n03/20410330.html>
- May, J. H., Spangler, W. E., Strum, D. P., & Vargas, L. G. (2011). The Surgical Scheduling Problem: Current Research and Future Opportunities. *Production and Operations Management*, 20(3), 392-405. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2011.01221.x>

- Meskens, N., Duvivier, D., & Hanset, A. (2013). Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the surgical team. *Decision Support Systems*, 55(2), 650-659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.10.019>
- Ozkarahan, I. (2000). Allocation of Surgeries to Operating Rooms by Goal Programing. *Journal of Medical Systems*, 24(6), 339-378. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005548727003>
- Parhizi, S., Steege, L. M., & Pasupathy, K. S. (2013). Mining the relationships between psychosocial factors and fatigue dimensions among registered nurses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 43(1), 82-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.11.010>
- Park, J., Kim, B.-I., Eom, M., & Choi, B. K. (2021). Operating room scheduling considering surgeons' preferences and cooperative operations. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107306>
- Rahimi, I., & Gandomi, A. H. (2021). A Comprehensive Review and Analysis of Operating Room and Surgery Scheduling. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1667-1688. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09432-2>
- RNpedia (2015). Operating Room Team. Recuperado 21 de julio de 2023, de <https://www.rnpedia.com/nursing-notes/medical-surgical-nursing-notes/operating-room-team/>
- Roland, B., di Martinelly, C., & Riane, F. (2006). Operating Theatre Optimization: A Resource-Constrained Based Solving Approach. 2006 International Conference on Service Systems and Service Management, 1, 443-448. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2006.320503>
- Rossi, F., Beek, P. van, & Walsh, T. (2006). *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier.
- Teunissen, C., Burrell, B., & Maskill, V. (2020). Effective Surgical Teams: An Integrative Literature Review. *Western Journal of Nursing Research*, 42(1), 61-75. DOI: <https://doi.org/10.1177/0193945919834896>
- Weaver, S. J., Rosen, M. A., DiazGranados, D., Lazzara, E. H., Lyons, R., Salas, E., Knych, S. A., McKeever, M., Adler, L., Barker, M., & King, H. B. (2010). Does Teamwork Improve Performance in the Operating Room? A Multilevel Evaluation. *The Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, 36(3), 133-142. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1553-7250\(10\)36022-3](https://doi.org/10.1016/S1553-7250(10)36022-3)

Zhu, S., Fan, W., Yang, S., Pei, J., & Pardalos, P. M. (2019). Operating room planning and surgical case scheduling: A review of literature. *Journal of Combinatorial Optimization*, 37(3), 757-805. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10878-018-0322-6>

Resumen FI Memoria de Título

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	:	Departamento de Ingeniería Civil Industrial
Carrera	:	Ingeniería Civil Industrial
Nombre del memorista	:	Francisco Alejandro Ríos Fierro
Título de la memoria	:	PLANIFICACIÓN DE CIRUGÍAS ELECTIVAS CONSIDERANDO AFINIDAD Y PREFERENCIAS EN EL EQUIPO QUIRÚRGICO
Fecha de la presentación oral	:	
Profesor Guía	:	Carlos Emilio Contreras Bolton
Profesor Revisor	:	
Concepto	:	
Calificación	:	

Resumen

La programación de cirugías es un tema crítico en muchos hospitales. Existen muchos trabajos que han abordado este tema, pero muy pocos han incorporado factores de relación humana a su resolución. Por ello, en esta memoria de título se busca considerar los conceptos de afinidad en el equipo quirúrgico y las preferencias de recursos del cirujano. Se implementa un modelo de programación lineal entera (ILP) y un modelo de programación con restricciones (CP). Además, cada modelo cuenta con tres versiones: i) sin considerar afinidad ni preferencias, ii) considerando afinidad y preferencias como restricciones, y iii) considerando afinidad y preferencias como parte de la función objetivo. Se busca descubrir cuál modelo y versión entrega mejores resultados al incorporar los factores de relación humana. Los resultados muestran que considerar estos factores como restricciones es deficiente, llegando a atender un 50% menos de pacientes y llegando a reducir la calidad del equipo en un 37,5%. Mientras, incorporarlos a la función objetivo permite mejorar en un 12,6% la calidad de los equipos sin apenas afectar la atención de pacientes. Se concluye que es factible y valioso incorporar el sistema propuesto al problema de planificación de cirugías y mejorar las condiciones laborales de los cirujanos.

