PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO Y GESTIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA LA RED DE SALUD PÚBLICA CHILENA

JOSÉ TOMÁS MARQUINEZ VACAREZZA

Tesis para optar al grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
SERGIO MATURANA VALDERRAMA

Santiago de Chile, (Agosto, 2022)

© MMXXII, JOSÉ TOMÁS MARQUINEZ VACAREZZA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

DISEÑO Y GESTIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA LA RED DE SALUD PÚBLICA CHILENA

JOSÉ TOMÁS MARQUINEZ VACAREZZA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

SERGIO MATURANA

JORGE VERA

VÍCTOR ALBORNOZ

MAX ANDRESEN

JUAN CARLOS FERRER

ANTOINE SAURÉ

HÉCTOR JORQUERA

Para completar las exigencias del grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Agosto, 2022

A todos quienes, de alguna u otra manera, me ayudaron a sacar adelante esto...

AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a mi familia, quienes nunca han dejado de apoyarme y de estar orgullosos sobre los distintos logros en mi vida. Gracias por la paciencia, preocupaciones, y por estar siempre ahí.

Segundo, agradecer a Alejandro Cataldo y Antoine Sauré, quienes han sabido guiarme tanto académica como profesionalmente en este agotador camino. Gracias por su guía a lo largo de estos años, por su "apañe" y por sus esclarecedores consejos. A Alejandro también por acercarme al mundo de la Investigación de Operaciones y al mundo docente; y a Antoine (y familia), por recibirme en Canadá durante la pasantía doctoral con tal calidez humana.

Quiero agradecer profundamente también a mi profesor guía Sergio Maturana. Por su constante apoyo, sus consejos, su experiencia y por todos los favores realizados a lo largo del doctorado. Sin duda, sin su ayuda este desafío habría tenido un resultado completamente distinto y le estaré eternamente agradecido por todo.

También me gustaría agradecer a mi comisión. A Max Andresen, quien prestó el tema de investigación y su eterna paciencia en la guía y unión entre el mundo de la ingeniería y de la medicina. A los profesores Jorge Vera, Víctor Albornoz, y Héctor Jorquera, quienes se sumaron (y se mantuvieron) también a la revisión paciente de este recorrido no exento de dificultades. Y por último, al profesor Juan Carlos Ferrer quien no sólo me aceptó en inicio como profesor supervisor, sino que también me enseñó indirectamente una lección invaluable sobre los valores importantes en la vida, además de la importancia de la perseverancia y de ser fiel consigo mismo. Sólo quienes saben mi historia del doctorado saben lo agradecido que estoy sobre esto.

Por último, no puedo dejar de agradecer a mis amigos/as y compañeros/as que me han acompañado a lo largo de este extenso proceso. Partiendo por Valentina Gutiérrez, quien

estuvo fielmente presente y apoyándome en el momento más difícil del doctorado. Al igual que Carolina Martínez, quien me apoyó calmando la espera del final del proceso. A todos con los que compartí oficina en postgrado, entre los que no puedo evitar mencionar a Jaime González, Carlos Lagos, Regina Reyes y Karla Stive. De ustedes aprendí mucho, y me ayudaron a ver hartas cosas sobre mi doctorado. A mis amigos del colegio, de la universidad y del ministerio, quienes mostraban constante preocupación por mis estudios. Y, por supuesto, a Karina Norambuena, Jacqueline González y Carmen Gloria Fuentes, por su buena energía que me ayudaba en la distensión en los momentos difíciles.

Agradecezco a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile por el financiamiento de mis estudios de postgrado mediante la beca CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2015-21150930.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos iv

Índice de figuras ix

Índice de tablas xi

ABSTRACT xvi

RESUMEN xvii

1. Introducción 1
   1.1. Contexto inicial 1
   1.2. Capacidad de una red de hospitales 1
   1.3. El caso chileno 3
   1.4. Contribuciones de la tesis 5
   1.5. Estructura de la tesis 8
   1.6. Acrónimos 9

2. Revisión bibliográfica 11
   2.1. Capacidad en salud 11
   2.2. Trabajo sobre redes 12
      2.2.1. Transferencias interhospitalarias de pacientes críticos en red 13
      2.2.2. Consideración del sector privado en la red 14
   2.3. Toma de decisiones proactivas en salud 14
      2.3.1. Proactividad de transferencia y derivación de pacientes 15
      2.3.2. Formas de lidiar con la maldición de la dimensionalidad en la literatura 17
   2.4. Vacíos en la literatura cubiertos por esta tesis doctoral 19

3. Definición del problema 21
   3.1. Problema de capacidad y transferencias 22
   3.2. Problema considerando UCIs y UTIs 24

3.3. Problema de expansión de capacidad 25

4. Enfoque de solución 26

4.1. Proceso de decisión markoviana 26

4.2. Resolución a través de programación dinámica aproximada 28

5. Aplicaciones 31

5.1. Transferencias interhospitalarias de pacientes que requieren UCI por sector 31

5.1.1. Formulación instanciada 31

5.1.2. Lidiando con la maldición de la dimensionalidad 38

5.1.3. Análisis sobre la política óptima aproximada para una instancia pequeña 42

5.1.4. Sobre la gravedad de los pacientes 60

5.2. Transferencias interhospitalarias de pacientes que requieren UCI a nivel regional 63

5.3. Transferencias interhospitalarias de pacientes que requieren UCI o UTI por sector 66

5.3.1. Formulación instanciada 67

5.3.2. Lidiando con la maldición de la dimensionalidad 73

5.3.3. Análisis sobre la AOP para una instancia diseñada 77

6. Diseño de políticas públicas 102

6.1. Desempeño del enfoque propuesto para el diseño de políticas públicas para la red de UCIs 103

6.1.1. Políticas de transferencias interhospitalarias de pacientes UCI 103

6.1.2. Políticas de aumento de capacidad UCI 111

6.1.3. Desempeño del enfoque propuesto para el estudio de transferencias interhospitalarias de pacientes UCI a nivel regional 119

6.2. Políticas públicas para la red UCI y UTI 124

7. Conclusión y trabajo futuro 129

7.1. Conclusiones principales 129

7.2. Limitantes y trabajo futuro 131

BIBLIOGRAFÍA 135

A N E X O S 148

A. Anexo A: Demostraciones 149

A.1. Demostración de que el problema (5.12) tiene la estructura de un problema de flujo en redes a costo mínimo 149

A.2. Demostración que una distribución exponencial se puede discretizar como una distribución geométrica 151

B. Anexo B: Ejemplos ilustrativos 155

B.1. Ejemplo 1 155

B.2. Ejemplo 2 155

B.3. Ejemplo 3 156

C. Anexo C: Casos con hospitales con el mismo nivel de especialización 158

C.1. Caso 1 con hospitales con el mismo nivel de especialización 158

C.2. Caso 2 con hospitales con el mismo nivel de especialización 159

C.3. Caso 3 con hospitales con el mismo nivel de especialización y UTI . . . 161

D. Anexo D: Casos con configuraciones particulares 164

D.1. Caso con todos los hospitales teniendo la misma capacidad 164

D.2. Caso en que un sólo hospital es levemente más especializado que el resto 165

E. Anexo E: Instructivo resultante de la política óptima aproximada 169

F. Anexo F: Modelos determinísticos para el problema de transferencias UCI . 173

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Total de movimientos de pacientes realizados a través de la Unidad de Gestión Centralizada de Camas (UGCC) entre el año 2014 y el año 2017. 4

1.2. Pago total a prestadores (entre enero y junio) 5

3.1. Diagrama del proceso de requerimiento de una cama crítica. 21

3.2. Diagrama de la secuencialidad del proceso de la toma de decisiones que rige el problema de la tesis. 24

5.1. Ahorro efectivo promedio logrado por la AOP para el caso base 50

5.2. Variación del valor de algunos coeficientes Y_{hgp} y Z_{hig} ante cambios del costo de derivación y atención en clínicas privadas, k_{hgp}. 51

5.3. Variación del valor del coeficiente Z_{hig} como resultado de cambios en los costos k_{hgp} y f_{hig}. 52

5.4. Costo esperado descontado marginal de hospitalizar a un paciente, U^*_{hg1}, para los escenarios propuestos en la Figura 5.3. 56

5.5. Servicios de Salud de la Región Metropolitana. 64

5.6. Variación del valor del coeficiente Z_{hgcij} como resultado de cambios en el costo f_{higc}. 90

5.7. Variación del valor del coeficiente $Z_{h,g,UTI,i,UCI}$, asociado a la ocupación de camas UCI por pacientes UTI, como resultado de cambios en los costos de derivación de pacientes UCI $k_{h,g,UCI,p}$. 92

5.8. Variación del valor del coeficiente Y_{hgcp} de derivación de pacientes como resultado de cambios en los costos k_{hgcp}. 93

5.9. Variación del valor del coeficiente $Z_{h,g,UTI,i,UCI}$, asociado a la ocupación de camas UCI por pacientes UTI, como resultado de cambios en los costos de derivación de pacientes UTI $k_{h,g,UTI,p}$. 93

5.10. Variación del valor del coeficiente Z_{hgcij} como resultado al modificar el costo adicional de atención de pacientes UCI (sin considerar ambulancia) por sobre el costo de atención de pacientes UTI. 95

6.1. Comparativa del desempeño de la AOP y la política miope (MP) de acuerdo a las diferentes medidas de desempeño consideradas. 106

6.2. Comparación en la cantidad de pacientes derivados al sector privado entre las políticas miope y AOP. 107

6.3. Aumento del ahorro a medida que aumenta la capacidad hospitalaria. 115

6.4. Aumento del ahorro a medida que aumenta la capacidad hospitalaria considerando el gasto por cama. 116

6.5. Aumento del ahorro a medida que se va fijando la ubicación de la nueva cama crítica. 117

6.6. Aumento del ahorro a medida que se va fijando la ubicación de una nueva cama crítica considerando el gasto por cama. 118

6.7. Tiempo de resolución según la cantidad de hospitales considerados en cada la instancia. 124

A.1. Función acumulada de una distribución exponencial 151

A.2. Función acumulada discretizada de la distribución exponencial 152

ÍNDICE DE TABLAS

5.1. Tasas de llegada, tiempos de estadía y utilización implícita usados en el caso base para el análisis de la política óptima aproximada (AOP). 43

5.2. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base (UCI). 44

5.3. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base (UCI) con $f_{hig} = 100, \forall h, i, g : h \neq i$. 46

5.4. Comparación de la tasa de ocupación efectiva al simular el caso base para la política miope (MP) y la AOP. 49

5.5. Comparación entre la política miope versus la política óptima aproximada para el caso base con respecto a diversas medidas de desempeño. 49

5.6. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base con $f_{hig} = 0, \forall h, i, g$. . 54

5.7. Valores de algunos coeficientes Z_{hig} e Y_{hgp} ante variaciones en el largo de estadía promedio para los pacientes del grupo $g = 1$. 57

5.8. Tasas de llegada de pacientes UCI, usado para el análisis de gravedad del caso base, en pacientes/día (λ_{hg}). 61

5.9. Valores de los coeficientes de pacientes transferibles obtenidos para el caso base (sólo UCI) considerando una porción de los grupos como intransferible. 62

5.10. Comparación de promedios entre la AOP obtenida para el caso base versus la AOP obtenida considerando una porción de pacientes intransferibles con respecto a diversas medidas de desempeño. 63

5.11. Información de las tasas de llegada y tiempos de estadía utilizados para pacientes UTI en el caso base para el análisis de las características de la AOP. 78

5.12. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base UCI-UTI. 80

5.13. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base UCI-UTI, con $f_{higc} = 100, \forall h, i, g, c : h \neq i$. 85

5.14. Comparación de la tasa de ocupación efectiva empírica de la política miope (MP) versus la política óptima aproximada (AOP) para el caso base, tanto permitiendo (AM) como prohibiendo (PM) que pacientes UTI ocupen camas UCI. 87

5.15. Comparación entre la política miope (MP) y la AOP para el caso base permitiendo que pacientes UTI ocupen camas UCI (AM), o bien prohibiendo dichas ocupaciones (FM), con respecto a diversas medidas de desempeño. . . 88

5.16. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base UCI-UTI considerando un costo de derivación de pacientes UCI $k_{hg(UCI)p}$ con valores entre 0 y 1000, $\forall h, g, p$ 91

5.17. Orden de preferencia para la transferencia/ocupación de camas de pacientes UTI del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$ a medida que la cantidad de camas UTI del hospital $h = 1$ varía, manteniendo la cantidad de camas totales fija. 97

5.18. Orden de preferencia para la transferencia/ocupación de camas de pacientes UTI del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$ a medida que la cantidad de camas UTI del hospital $h = 3$ varía, manteniendo la cantidad de camas totales fija. 98

6.1. Grupos de diagnósticos utilizados para el caso basado en la realidad, conocidos como Categorías Diagnósticas Mayores. 104

6.2. Tasas de llegada, en pacientes/día, utilizados para el caso basado en la realidad (λ_{hg}). 104

6.3. Largos de estadía promedio, en cantidad de días, utilizados para el caso basado en la realidad, asociados con ρ_{hgl}. 104

6.4. Resumen de datos utilizados para la aplicación al sistema de UCIs chileno. . 105

6.5. Tasas de ocupación efectiva empírica obtenidas por la AOP y la política actual (Miope), al simular el sistema para la aplicación práctica chilena. 107

6.6. Existencia de proactividad para distintas ocupaciones generadas por cambios en la tasa de entrada. 110

6.7. Comparación de los costos descontados esperados futuros asociados al caso actual y al caso en que cada uno de los tres hospitales de la red cuenta con una cama crítica más, obtenidos siguiendo una AOP. 113

6.8. Comparación de los costos descontados asociados con el caso actual y el caso en que cada uno de los tres hospitales de la red cuenta con una cama crítica más, en miles de pesos, obtenidos usando a la política miope. 114

6.9. Grupos de diagnóstico utilizados para la aplicación a los servicios de salud y para la inclusión de pacientes UTI en el caso real. 120

6.10. Tasas de llegada, en pacientes/día, utilizados para el caso con información agrupada a nivel de servicios de salud (λ_{hg}). 121

6.11. Largos de estadía promedio, en cantidad de días, utilizados para el caso de información agrupada a nivel de servicios de salud, asociados con ρ_{hgl}. 121

6.12. Resumen de los datos utilizados para la aplicación al sistema de servicios de salud del sector metropolitano. 122

6.13. Resumen de los valores de los coeficientes obtenidos para la resolución del caso de los SSs del sistema metropolitano. 122

6.14. Tiempo de resolución según el tamaño de la instancia. 124

6.15. Resumen de datos de los pacientes UCI utilizados para la simulación del caso práctico. 126

6.16. Resumen de datos de los pacientes UTI utilizados para la simulación del caso basado en la realidad. 126

6.17. Tasas de llegada (λ_{hgc}), en pacientes/día, utilizado en la aplicación práctica del caso UCI-UTI. 126

6.18. Tiempo de estadía promedio, en días, asociado a los valores de ρ_{hgcl} para la aplicación práctica del caso UCI-UTI. 127

6.19. Comparación entre la política miope y una política óptima aproximada que permite que pacientes UTI ocupen camas UCI, para un caso basado en la realidad, con respecto a diversas medidas de desempeño. 127

6.20. Comparación de las ocupaciones obtenidas a partir de la simulación de la política miope (MP) versus la política óptima aproximada (AOP) para el caso basado en la realidad. 128

C.1. Información de las tasas de llegada y tiempos promedio de estadía utilizados para el Caso 1 en que los hospitales tienen el mismo nivel de especialización. 158

C.2. Valores de los coeficientes que definen la AOP para el Caso 1 con hospitales con el mismo nivel de especialización. 159

C.3. Información de las tasas de llegada y tiempos promedio de estadía utilizados para el Caso 2 en que los hospitales tienen el mismo nivel de especialización. 160

C.4. Valores de los coeficientes que definen la AOP para el Caso 2 con hospitales con el mismo nivel de especialización. 160

C.5. Información de las tasas de llegada y tiempos promedio de estadía utilizados para el Caso 3, en que los hospitales tienen UCI y UTI y el mismo nivel de especialización. 162

C.6. Valores de los coeficientes que definen la AOP para el Caso 3 con preferencia en la ocupación UTI-UCI 163

D.1. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso en que todos los hospitales tienen la misma capacidad. 164

D.2. Información de las tasas de llegadas y tiempos de estadía utilizados para el caso de leve diferencia en especialización 165

D.3. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso con leve diferencia en especialización. 165

D.4. Valores de algunos coeficientes Z_{hig} y Y_{hgp} ante variaciones en el largo de estadía promedio para los pacientes del grupo $g = 1$ en el hospital $h = 3$. . . 167

ABSTRACT

This doctoral thesis explores several aspects of the problem that a centralized network of hospitals faces when receiving Intensive Care Unit (ICU) patients. On one hand, they deal with the uncertainty given by patient arrivals and their lengths of stay. On the other hand, they face a lack of critical beds within the systems. It seeks to support the decision-making process regarding admission, transfer and diversion of critical patients within the network. In order to do so, this thesis presents an approach built around the use of approximate stochastic dynamic programming to determine whether it is convenient or not to do proactive transfers and diversions. That is, transferring or diverting patients even though the hospital of first arrival still has available critical beds.

The proposed methodology is applied to several problems, to verify the convenience of adopting a proactive approach. This includes helping the decision-maker to identify which types of ICU patients should be transferred or diverted, and to which facility. In addition, the approach is used to estimate the value of an additional bed in the network, along with a dynamic expansion plan. Lastly, the approach is also applied to a hospital network considering several complexity levels, such as a network with ICU and Intermediate Treatment Units (ITU). The performance of the policy obtained for real-sized instances of the problems is also studied. These instances are based on the reality of several Health Services of the Metropolitan area of Santiago, Chile. It is possible to observe a significant reduction in the associated costs when compared with the actual procedure.

Simulation results suggest that Chile or any centralized administrator of a network of resources would benefit from applying this methodology whether to determining proactive transfer and diversion policies or to validating that the current practice.

Keywords: Healthcare management; Hospital network; Bed management; ICU; Capacity planning; Dynamic Programming; Approximate Dynamic Programming; LP; Simulation; Markov Decision Process.

RESUMEN

Esta tesis doctoral explora diversas aristas sobre el problema que enfrenta una red centralizada de hospitales que recibe pacientes con requerimiento de cuidado en Unidades de Cuidado Intensivo (UCIs). Dado, por un lado, la aleatoriedad existente en la llegadas de los pacientes y en su tiempo de estadía, y por otro lado, la escasez de camas hospitalarias en los sistemas, es necesario apoyar la toma de decisiones de admisión, transferencia y derivación de pacientes en la red. Para ello, se propone una metodología basada en programación dinámica estocástica aproximada, que permite verificar si es o no conveniente realizar transferencias y derivaciones de forma proactiva. Es decir, transferir o derivar pacientes incluso cuando el hospital al que llegan cuenta con camas críticas disponibles.

Esta metodología fue aplicada a diversos problemas, para verificar si conviene adoptar un enfoque proactivo en estas decisiones. En particular, para determinar qué tipo de pacientes UCI es necesario transferir/derivar, y hacia dónde. Además, se utilizó para determinar el valor de una cama adicional en la red de hospitales, junto a un plan de expansión que se adapta a una dinámica proactiva de movimiento de pacientes. Por último, también se aplicó sobre una red de hospitales con diversos niveles de complejidad, como lo podría ser una red con UCI y Unidades de Tratamiento Intermedio (UTI). También se estudió el desempeño de la política para instancias de tamaño real, basados en la realidad de diversos Servicios de Salud del sector metropolitano de Chile. Se pudo observar una reducción significativa del gasto estatal al simular la política y compararla con el proceder actual.

Los resultados obtenidos indican que Chile o (y cualquier red de hospitales con tomador de decisiones centralizado) se vería beneficiado con la aplicación de esta metodología en sus decisiones, ya sea para determinar una política proactiva de transferencias y derivaciones o bien para validar que su proceder es el adecuado.

Palabras Claves: Gestión en Salud; Red de Hospitales; Gestión de Camas; UCI; Capacidad; Programación Dinámica; Programación Dinámica Aproximada; LP; Simulación; Proceso de Decisión Markoviano.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto inicial

La gestión de capacidad en el ámbito de Salud es un tema de alto impacto, principalmente debido a lo costoso que es para quien presta el servicio y lo crítico que es para quien lo recibe. La medida fundamental para medir la capacidad de un sistema hospitalario es la cantidad de camas críticas que posee (Green, 2005), la cual suele ser demasiado restrictiva. En particular, algunos pacientes que ingresan desde las salas de urgencia pueden ser categorizados como pacientes críticos que requieren atención urgente, y pueden llegar a requerir atención en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) (Chan et al., 2017).

Las UCIs atienden a un variado espectro de pacientes. Algunos pueden requerir atención por enfermedades o heridas inesperadas, otros por condiciones pre-existentes, o incluso puede que solamente necesiten cuidado antes y después de pasar por procedimientos quirúrgicos complejos (Canadian Institute for Health Information, 2016). Para nombrar algunos ejemplos, pacientes que sufrieron un infarto al miocardio o una falla respiratoria, o que requieren una intervención abdominal a la aorta pueden llegar a requerir este tipo de atención. Y, dado que todos estos pacientes requerirán una cama crítica en la UCI de un hospital, una administración correcta de este recurso clave podría permitir una pronta admisión de una mayor cantidad de pacientes, sin la necesidad de aumentar la cantidad de camas.

1.2. Capacidad de una red de hospitales

El problema de administración de camas críticas se vuelve aún más complejo cuando se trata a nivel de una red de hospitales. Una red de hospitales, o red multihospital, es un conjunto de dos o más hospitales que trabajan en conjunto para coordinar y otorgar un número de servicios a la comunidad (American Hospital Association, 2019). En países con una red de hospitales como Chile, Estados Unidos o el Reino Unido, los pacientes

suelen ser transferidos entre hospitales, principalmente para recibir atención especializada o un tratamiento no disponible en el hospital de llegada (Hailemariam, 2016), o por falta de camas disponibles en ese momento (Mahar et al., 2011). Este tipo de transferencias interhospitalarias son particularmente comunes en Estados Unidos y en el Reino Unido. Otros países, como Hong Kong por ejemplo, transfieren pacientes entre regiones si la diferencia en los tiempos de espera para ser atendido es significativa (Chao et al., 2003a). Sin embargo, el ingreso y admisión efectiva de pacientes en cada uno de los hospitales se puede ver limitada si no existe una adecuada gestión de camas. Si eso ocurre, algunos pacientes tendrán que esperar por su atención (Shi et al., 2016), lo que podría ser perjudicial para su salud; o no podrán ser atendidos en el hospital al que llegan, lo que generaría costos para el sistema al tener que derivarlos a otro recinto hospitalario.

Típicamente, cuando un paciente crítico llega a un hospital con la necesidad de una cama crítica UCI, primero es estabilizado y luego el equipo del hospital debe determinar si hay capacidad para admitirlo(a) en esta unidad (Kim et al., 2015). Esto es realizado luego de que el paciente es estabilizado y la evaluación ha sido completada (Ministerio de Salud de Chile, 2019; Hailemariam, 2016). Si no hay camas críticas disponibles en el hospital, el paciente (dada su condición crítica) debe ser transferido a otro hospital dentro de la red de hospitales. Sin embargo, si, en el caso de una red pública, ningún hospital tiene alguna cama crítica disponible, puede que no haya otra opción que derivarlo a un recinto privado a un precio que dependerá del diagnóstico del paciente y que suele ser bastante más elevado.

Esta tesis busca evaluar decisiones de admisión y de transferencia/derivación de pacientes de dos formas distintas: reactiva y proactivamente. El enfoque reactivo es el que se describe arriba y es el más común en el mundo. El enfoque proactivo, por otro lado, es el que se presenta en este artículo, el cual considera la transferencia de pacientes a otros hospitales públicos o derivarlos a clínicas privadas incluso cuando la UCI en el hospital de llegada sí tiene camas disponibles. Se busca mostrar que decisiones proactivas de admisión y transferencia/derivación de pacientes pueden reducir significativamente los costos

asociados e incrementar el número de pacientes críticos que reciben cuidado en el sector público, sin perjudicar el estado de salud de los pacientes. Sin embargo, decidir qué tipo de pacientes transferir o derivar de forma proactiva, y dónde dirigirlos, es una tarea extremadamente desafiante que considera una enorme cantidad de escenarios posibles y cursos de acción alternativos. Por lo tanto, dado lo costoso y crítico que es tomar decisiones de admisión, transferencia y derivación a un nivel de red, hay una clara e importante necesidad de desarrollar enfoques analíticos para identificar de forma sistemática políticas proactivas que permitan usar de forma eficiente que la capacidad disponible en una red multihospital y, así, reducir la cantidad de pacientes atendidos fuera del sistema y el gasto fiscal.

1.3. El caso chileno

En Chile existe una Red de Salud Pública (RSP) en la que cada hospital tiene su propia administración (tanto financiera como operacional). En cada hospital, cuando un paciente crítico requiere cuidado en la UCI, se levanta un requerimiento interno para determinar si es que hay o no alguna cama crítica disponible (o bien, si es que alguna se va a desocupar dentro de poco). Si este no es el caso, se levanta un requerimiento hacia afuera del hospital, dirigido a la UGCC. Esta unidad administra y comparte la información relacionada a la disponibilidad de camas a lo largo de la red, usando un registro en línea que cuenta con esta información. De esta forma, es capaz de indicar hacia dónde debe transferirse un paciente en caso de ser necesario. Es importante notar que este destino, dependiendo de la capacidad actual del sistema, puede ser un hospital público o alguna clínica u hospital privado. Estos últimos son escogidos a partir de una lista de aquellos que se han adjudicado licitaciones para atender a pacientes críticos cuando el sistema público lo requiere (Eichholz et al., 2010; Ministerio de Salud de Chile, 2018). Es importante mencionar que en el sector privado chileno, como en otros países, hay suficientes camas como para absorber todo el exceso de demanda por cuidados UCI que provenga del sector público.

De todos los pacientes críticos que llegan a hospitales públicos en Chile, el 95,42 % se atienden en el mismo hospital público al que llegan. El resto son trasladados a otros recintos hospitalarios públicos o privados. A pesar de que el sistema público chileno cuenta con alrededor de 1.334 camas críticas, más del 70 % de estos traslados son dirigidos al sistema privado chileno (Lara et al., 2016; Ministerio de Salud de Chile, 2018). La Figura 1.1 ilustra cómo se ha mantenido una alta derivación de pacientes al sector privado en el tiempo. Como se puede apreciar, la porción de pacientes que va al sector privado ha ido aumentando. Esto genera costos adicionales para el Estado por concepto de atención de pacientes críticos, pues el costo promedio de atención en una cama crítica de un recinto privado es casi tres veces el costo promedio de atención en una cama crítica del sector público (Ministerio de Salud de Chile, 2018).

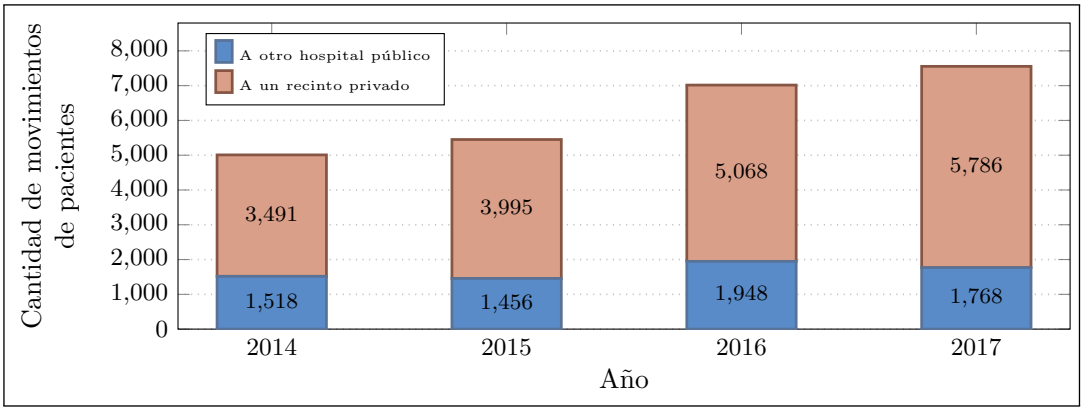


Figura 1.1. Total de movimientos de pacientes a través de la UGCC entre el 2014 y el 2017.
Fuente: Ministerio de Salud de Chile (2018)

La tercerización de la atención de pacientes críticos, sus contratos y sus cobros correspondientes se hacen según una clasificación conocida como Grupos Relacionados de Diagnóstico (GRDs) (Berlinguet et al., 1983). A un paciente se le asigna un código que indica a qué grupo pertenece su diagnóstico. Así, los recintos privados cobran dependiendo del grupo al que pertenece el paciente, hasta que se dé de alta, independiente del largo

de su estadía en una cama crítica (Ministerio de Salud de Chile, 2019). La Figura 1.2 ilustra cómo ha ido incrementando el pago a recintos privados por concepto de prestación de servicios en el tiempo.

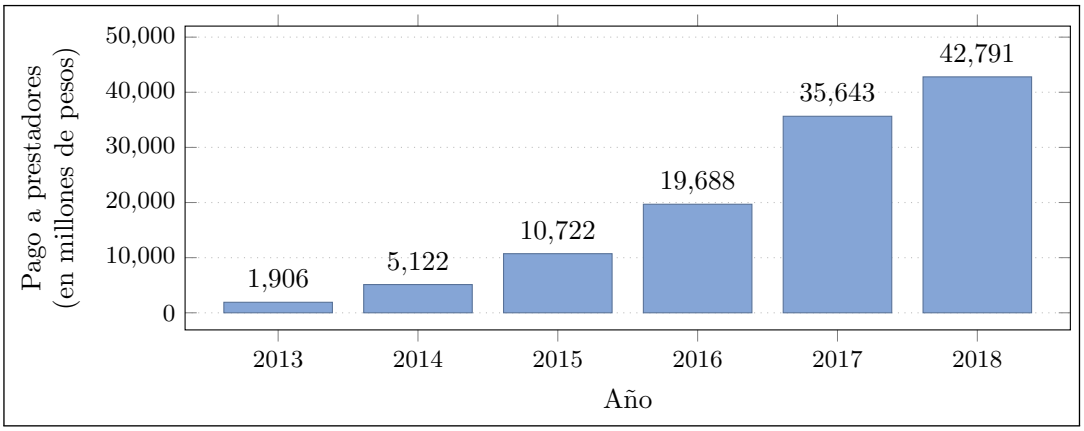


Figura 1.2. Pago total a prestadores (entre enero y junio).
Fuente: Leiva (2016), Ministerio de Salud de Chile (2018), Chávez (2018)

En Chile, las decisiones relacionadas a la transferencia y derivación de pacientes son reactivas, y responden a la urgencia de otorgar cuidado a cada paciente lo más rápido posible en una cama que cumpla con sus requerimientos una vez que el hospital de llegada no puede atenderlo. También es importante mencionar que los chilenos perciben significativamente mejor el ciudado que reciben en una clínica privada que en un hospital público (Aravena and Inostroza, 2015). A pesar de eso, solamente el 17 % de la población chilena tiene seguro privado de salud (ISAPREs), principalmente por sus altos costos. Con respecto a la calidad de salud otorgada en el sector público, los chilenos la perciben igual independiente del hospital y del largo de estadía de los pacientes, dado que el resultado médico puede ser considerado similar.

1.4. Contribuciones de la tesis

La complejidad práctica y metodológica del problema de transferencia y derivación de pacientes en una red de hospitales ha sido abordada en la literatura generalmente aspirando a modificar la estructura del sistema. Esto es, aumentando la capacidad, definiendo

nuevos tipos de cama o bien redistribuyendo la capacidad existente. Son pocos los estudios que han intentado hacer más eficiente el uso de los recursos existentes, y menos aún los que consideran la relación interhospitalaria y/o con un sector privado que permite atender sobredemanda. En esta tesis doctoral se busca resolver este problema y sus diversas aristas a un nivel de granularidad que las metodologías existentes no permitirían resolver.

Esta investigación doctoral cuestiona la política de movimiento reactivo en la que se basa actualmente la RSP y la UGCC (y que se usa en muchas partes del mundo). Es decir, aquella que decide transferir a pacientes a otro hospital público o al sistema privado sólo si el hospital al que llegó en un principio no tiene capacidad. Esta tesis busca mostrar que decisiones proactivas de admisión, transferencia y derivación pueden reducir significativamente los costos asociados y aumentar el número de pacientes críticos que son atendidos en la RSP, sin perjudicar su salud.

Basado en cómo el sistema chileno funciona actualmente, esta propuesta de políticas de transferencias y derivaciones proactivas cobra sentido al ser bastante apropiada. Aún cuando los pacientes (que tienen seguro público de salud, o FONASA) que presentan una urgencia deben ser llevados (por ley) al hospital o clínica más cercano, independiente de su ubicación, estos no deberían quedarse ahí una vez estabilizados, a menos que sea un hospital público y el paciente viva en su sector de cobertura. Así, una proporción no menor de pacientes críticos ya son transferidos entre hospitales públicos una vez que han sido estabilizados, independiente de su deseo o el de sus familiares. La situación cambia si la derivación, en cambio, resulta ser a una clínica privada, pues, como fue mencionado, se percibe que recibirán un cuidado y recuperación de mejor calidad por lo que no suelen ocurrir objeciones ante este tipo de derivación. Así, en esta tesis doctoral se busca mostrar que políticas proactivas de transferencia y derivación de pacientes, que es una posibilidad real para redes de hospitales públicos como el chileno, pueden ser exitosamente implementadas en sistemas de salud similares al chileno. Políticas que faciliten el movimiento proactivo de pacientes UCI podrían ser bien recibidas por la población y ser beneficiosas para el gobierno, en términos monetarios.

De esta forma, se busca resolver un problema de gestión de camas en red, considerando un alto nivel de diferenciación de pacientes y diversos niveles de ocupación entre hospitales del sistema. Cualquier sistema centralizado de administración de servidores que compartan sus recursos se ve enfrentado a este problema. Sin embargo, la solución propuesta está motivada en la experiencia del sistema de salud chileno.

Esta tesis doctoral también contribuye a la literatura mediante la formulación y el desarrollo de un enfoque de solución para una problemática presente en cualquier red que siga esta estructura de flujos, en que la capacidad limitada de la red se encuentra distribuida entre diversos nodos y en que se tiene un sumidero de sobredemanda externo (o bien, una penalización por demanda insatisfecha).

En particular, la principal contribución de este trabajo doctoral viene dada por la metodología presentada, que no ha sido usada anteriormente en este ámbito considerando problemas de tamaño práctico. Esta metodología permite considerar: (i) una cantidad plural de hospitales (red), (ii) una alta diferenciación de pacientes, y (iii) la colaboración entre una red pública y una privada a través de la externalización de servicios. Considerar tal nivel de granularidad suele resultar en formulaciones con un tamaño que hace que la resolución directa del problema sea intratable (Schweitzer and Seidmann, 1985; Bertsekas, 2011). Sin embargo, la metodología propuesta permite realizar diversos tipos de análisis sobre la red y derivar políticas útiles para un tomador de decisiones.

Esta tesis en primer lugar permite demostrar que es conveniente, en términos monetarios, transferir pacientes críticos que requieren de camas críticas UCI de manera proactiva. Es decir, transferir o derivar aún cuando el hospital que los recibe en primera instancia cuente con capacidad disponible para recibirlos.

En segundo lugar, y siguiendo el mismo hilo, esta tesis busca mostrar que también puede ser conveniente realizar transferencias y derivaciones proactivas a otros hospitales públicos y a recintos privados de pacientes que requieren de camas de Unidades de Tratamientos Intermedios (UTIs), permitiendo lograr un menor gasto estatal. Esta es una

extensión al problema anterior, considerando que hay pacientes críticos que pueden ocupar, dependiendo de su gravedad y la saturación del sistema, una cama de UTI y/o una de UCI. De esta forma, se busca determinar si mejora la eficiencia en gastos al introducir políticas de este tipo para decidir sobre movimientos de pacientes que requieren camas de UCIs y de UTIs. Esto aporta a la literatura, no solo desde el ámbito metodológico, si no que también porque no se ha logrado encontrar trabajos anteriores que traten del tema de compartir capacidad de camas de cuidado intermedio, como lo son las camas de UTIs.

Por último, este trabajo doctoral también busca desarrollar una heurística que permita usar la metodología presentada para determinar en qué hospital de un sistema de hospitales conviene más agregar una cama adicional. Esta metodología podría ser aplicada ya sea para aumentar la capacidad de las UCIs de forma local en cada hospital de un sistema de salud, o bien para indicar en qué sistema de salud particular conviene más agregar una cama crítica adicional. Este subproblema contribuye en la literatura mostrando una nueva forma de determinar políticas de expansión de capacidad que, a su vez, determinan políticas de movimiento de pacientes.

Desde el ámbito social, y en miras al país, esta tesis doctoral busca aportar con la definición de políticas públicas asociadas a la transferencia de pacientes en la red de salud público chilena. Esto se busca realizar utilizando instancias basadas en la realidad y los descubrimientos realizados a lo largo de la investigación.

1.5. Estructura de la tesis

A continuación se describe cómo se estructura el resto de este documento. En el capítulo 2 se revisa el estado del arte sobre gestión de capacidad hospitalaria. En particular, sobre el problema de transferencia interhospitalaria de pacientes, junto con distintas aplicaciones de la metodología aplicadas a lo largo de la tesis. En el capítulo 3 se define el problema a ser estudiado, junto a los subproblemas que se tratan. En el capítulo 4 se describe el esqueleto metodológico para resolver el problema definido. En él se puede apreciar

la formulación matemática general junto a la forma de resolverlo. A continuación, en el capítulo 5 se muestran resultados para diversas aplicaciones del modelo, mostrando los diversos resultados obtenidos. En el capítulo 6 se muestran resultados, en forma de políticas públicas, que le pueden ser útiles al tomador de decisiones del sector de salud para hacer más eficiente el uso de recursos públicos. Finalmente, en el capítulo 7 se expresan las conclusiones obtenidas a partir de esta investigación doctoral y se proponen extensiones para ser desarrolladas en el futuro.

1.6. Acrónimos

A continuación se listan las definiciones de los acrónimos utilizados a lo largo de la tesis.

- ADP: Programación Dinámica Aproximada. (acrónimo dado por sus siglas en inglés, *Approximate Dynamic Programming*).
- AH: Hospital Padre Alberto Hurtado San Ramón
- ALP: Programación Lineal Aproximada (acrónimo dado por sus siglas en inglés, *Approximate Linear Programming*).
- AOP: Política óptima aproximada (acrónimo dado por sus siglas en inglés, *optimal approximate policy*)
- BL: Hospital Barros Luco Trudeau.
- ED: Hospital Clínico Metropolitano La Florida Dra. Eloisa Diaz Insunza
- EP: Hospital El Pino.
- GRD: Grupos Relacionados de Diagnóstico.
- IO: Investigación de Operaciones.
- LC: Hospital Dr. Lucio Córdova
- MDC: Categorías Diagnósticas Mayores (acrónimo dado por sus siglas en inglés, *Major Diagnostic Categories*).
- MDP: Proceso de Decisión Markoviano (acrónimo dado por sus siglas en inglés, *Markov Decision Process*).

- POA: Política Óptima Aproximada.
- RSP: Red de Salud Pública.
- SB: Hospital Parroquial de San Bernardo.
- SR: Complejo Hospitalario Dr. Sótero del Río.
- SS: Servicio de Salud.
- SSMS: Servicio de Salud Metropolitano Sur.
- SSMSO :Servicio de Salud Metropolitano Sur Oriente.
- UCI: Unidad de Cuidados Intensivos.
- UI: Utilización implícita.
- UGCC: Unidad de Gestión Centralizada de Camas.
- UTI: Unidad de Tratamientos Intermedios.
- VFA: Aproximación de la Función Valor (acrónimo dado por sus siglas en ingles, *Value Function Approximation*)

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Capacidad en salud

Debido a que la disponibilidad de capacidad (entendida ya sea como cantidad de camas, de personal y/o de equipamiento) es crítica para que los pacientes puedan recibir salud de calidad y a tiempo, son diversos los autores que han realizado categorizaciones detalladas de estudios sobre la planificación de capacidad en salud (Smith-Daniels et al., 1988; Green, 2005; Bhattacharjee and Ray, 2014). En la literatura es posible encontrar diversas metodologías que han sido utilizadas para afrontar este gran cuello de botella en la provisión de salud. Las principales de ellas son simulación (e.g., Gopakumar et al., 2009; Troy and Rosenberg, 2009), teoría de colas y optimización estocástica (e.g., Kokangul, 2008; Ben Abdelaziz and Masmoudi, 2012), principalmente debido a la alta estocasticidad que presenta el sistema. Entre los principales factores de aleatoriedad se encuentran los relacionados con el instante de llegada y el largo de la estadía de los pacientes, que influyen directamente en cualquier cálculo de requerimientos de camas en un hospital (Harper and Shahani, 2002).

Como la medida fundamental para medir la capacidad de un sistema hospitalario es la cantidad de camas críticas que posee (Green, 2005), es de interés analizar cómo es que se ha buscado solucionar el tema de gestión pública de este recurso particular en la literatura. Este problema ha sido tratado desde diversos ámbitos, dado el desafío metodológico que presenta (Bhattacharjee and Ray, 2014). La forma más utilizada de enfrentar este problema es a través del diseño y redistribución de capacidad, intentando encontrar un equilibrio entre la cantidad de camas ofrecidas y la demanda existente. Con este fin, por ejemplo, se ha intentado redistribuir la capacidad disponible a lo largo de una red de hospitales (Kao and Tung, 1981; Cardoso et al., 2015), estudiar la creación de nuevos tipos de habitación (Griffin et al., 2012; Armony et al., 2018), o determinar la capacidad óptima de cada hospital (Kokangul, 2008; Mathews and Long, 2015; Fowler et al., 2015).

Sobre este último enfoque, son diversos los estudios y los enfoques de solución que se han utilizados. Por ejemplo, Harper and Shahani (2002) considera varios tipos de flujos de pacientes para obtener los requerimientos de camas en el tiempo utilizando simulación. Por otro lado, Schwartz and Cullen (1981) analizan datos reales de un hospital en particular para determinar, luego de clasificar a los pacientes según tipo de estadía, la cantidad necesaria de camas críticas.

Sin embargo, existe una línea de investigación con otra perspectiva, como la empleada en parte de esta tesis, que es optar por lograr una mejor administración de la capacidad y mejorar la utilización de los recursos ya disponibles (e.g., Ben Bachouch et al., 2012). Algunos trabajos han sido motivados por esta perspectiva incluso para llegar a describir la importancia de contar con camas críticas disponibles de forma de reducir índices de morbilidad (Lara et al., 2016), que destacan la gestión de procesos para gestionar adecuadamente las camas críticas en situaciones de pandemia (Kuiper et al., 2021), e incluso en los que se proponen políticas de transferencia intrahospitalaria de pacientes entre distintas unidades de internación (González, 2017; González et al., 2018). En esta misma línea, también existen numerosos artículos que respaldan en sus conclusiones una de las principales motivaciones de esta tesis: la importancia de compartir recursos entre diversos hospitales (Fowler et al., 2015; Olafson et al., 2015). Para más artículos y metodologías en el área de gestión de capacidad en Salud, se sugiere consultar las revisiones de literatura realizadas por Lakshmi and Iyer (2013) y Bhattacharjee and Ray (2014).

2.2. Trabajo sobre redes

Cuando se analizan artículos que estudian diseños de redes, son diversos los encontrados y en variados contextos (Cataldo et al., 2017). Por ejemplo, en producción y logística (Georgiadis et al., 2011; Shu et al., 2012), transporte (Hsu and Wen, 2002; Uchida et al., 2007; Agarwal and Ergun, 2008) y distribución de recursos (Ghatee and Hashemi, 2009; Babonneau et al., 2012; De Corte and Sörensen, 2013). Sin embargo, contribuciones en el ámbito público, como la de esta tesis doctoral, son más difíciles de encontrar. Se ha

apoyado, por ejemplo, la ubicación de bomberos o la ubicación de paraderos de transporte público (Schilling et al., 1993; Farahani et al., 2012), diseño de redes de cárceles (Hernández et al., 2012), o el diseño de un sistema de ventanilla electrónica única para la selección y priorización de servicios de gobierno (Cataldo et al., 2017). De forma más aterrizada, Martínez et al. (2011) proponen la distribución del alumnado en una red de colegios utilizando modelos de equilibrio logit restringido, mientras que Marianov and Fresard (2005) describen un modelo de localización de planta con un procedimiento de mínimo arrepentimiento para determinar la ubicación de nuevas cárceles chilenas y las zonas asignadas a cada una.

2.2.1. Transferencias interhospitalarias de pacientes críticos en red

Al enfocar las investigaciones sobre redes al área de Salud, la cantidad de literatura se reduce más. Bhattacharjee and Ray (2014) proveen una extensa revisión de la literatura de trabajos que consideraron una red de modelos de cola en los últimos años. Algunos de ellos reconocen la importancia de funcionar como red, por ejemplo, al llevar a cabo la planificación de camas ante crisis o epidemias (Vasilakis and El-Darzi, 2001) o, como ya fue mencionado, para estudiar la opción de agregar nuevos tipos de habitaciones (Griffin et al., 2012).

Diversos autores han tratado mejorar el uso de los recursos y acceso de los pacientes a la red de salud, bajo una configuración multihospital. Ruth (1981) analiza la reasignación de capacidad de camas en una red de salud, mientras que Cardoso et al. (2015) utilizan modelos de optimización estocásticos para el mismo fin, ambos con el fin de minimizar costos. También, Litvak et al. (2008) describen un modelo para determinar la cantidad ideal de camas UCI que se deben reservar para recibir a pacientes desde otros hospitales. Además, Dobson et al. (2010) estudian el desempeño de estrategias de movimientos de pacientes internamente, considerando distintos escenarios estocásticos. También, Lotfi and Behnamian (2022) estudian sobre el desempeño hospitalario logrado al coordinar agendamiento de salas de operación entre diversos hospitales.

Dentro de los autores que han estudiado redes de hospitales, muchos coinciden en que la cooperación entre hospitales ayuda a mejorar el servicio a los pacientes con un número menor de camas, logrando un alto nivel de admisión de pacientes.

2.2.2. Consideración del sector privado en la red

No son muchos los artículos presentes en la literatura que consideran una relación entre el ámbito público y el privado, particularmente transferencias de pacientes. La forma general en la que se tratan en la literatura los problemas de falta de camas para atender pacientes es a través de políticas de espera los recintos de salud, en lugar de derivar a otros recintos (e.g., Koizumi et al., 2005).

Sin embargo, hay unos pocos que sí consideran la posibilidad de que los pacientes puedan ser atendidos fuera del sistema. Por ejemplo, Mahar et al. (2011) consideran transferencias interhospitalarias de pacientes urgentes y no urgentes, para evitar una penalización por demanda insatisfecha. Sin embargo, su foco está en analizar las decisiones estratégicas de aumento y distribución de capacidad a lo largo de una red de hospitales. Lo anterior con el fin de que los costos de aumento de capacidad sean lo más bajo posible, manteniendo cierto nivel de servicio (definido como la fracción de demanda satisfecha), en lugar de enfocarse en aumentar la eficiencia de los recursos existentes en una red. Por otra parte, Chao et al. (2003b) utilizan modelos de programación dinámica estocástica para la asignación de recursos y la gestión del flujo de pacientes entre hospitales de una red público-privada. Sin embargo, los autores no consideran ningún costo de tercerización de servicios pues consideran que los pacientes pueden esperar por la atención indefinidamente.

2.3. Toma de decisiones proactivas en salud

Existen diversos estudios que llaman a la toma de decisiones proactivamente. Por ejemplo, Hu et al. (2018) utilizan técnicas de emparejamiento multivariado basado en información histórica de un hospital para proponer admisiones proactivas de pacientes en

salas de cirugía. Más relacionados aún al problema y enfoque de solución que se propone en esta tesis, son los trabajos que emplean una metodología basada en **Procesos de Decisión Markovianos** (MDPs, por sus siglas en inglés) para la resolución del problema. Los MDPs suelen ser la forma estándar utilizada para representar situaciones de toma de decisiones secuenciales en el tiempo. La idea detrás de esta metodología se basa en árbol de decisiones para resolver problemas de optimización dinámicos y estocásticos (Bertsekas, 2011).

Los MDPs han sido ampliamente utilizados en el área de salud. Por ejemplo, Gocgun et al. (2011) usan un MDP para determinar a qué grupo de pacientes agendar primero en el contexto de tomografías computarizadas si es que la fila de espera para estos exámenes es muy larga. Nunes et al. (2009) usan un MDP para controlar la admisión de pacientes en un hospital, con el fin de mantener la utilización de recursos a un cierto nivel deseado. Por otra parte, Zhu et al. (2012) también usan un MDP para agendar consultas médicas electivas dependiendo de la ocupación del sistema. Los autores usan simulación para resolver el problema dado el gran tamaño del modelo resultante. Más recientemente, Vreeken (2021) proponen un MDP para agendar pacientes y determinar qué tipo de pacientes agendar con qué tipo de doctor, mientras que Oh et al. (2021) también usan un MDP para asistir a la prescripción de medicación para diabetes.

2.3.1. Proactividad de transferencia y derivación de pacientes

A pesar de que, por un lado, los MDPs han sido usados en aplicaciones en el área de la salud y de que, por el otro lado, problemas de administración de camas han sido ampliamente estudiados en la última década, el problema de admisión, transferencia y derivación dinámica de pacientes en una configuración multihospital y bajo un número grande de tipos de pacientes no ha recibido mucha atención. Los estudios más relacionados al tema de esta tesis son los de Helm et al. (2011), Chao et al. (2003a), Chao et al. (2003b), Hu et al. (2018) y Hailemariam (2016).

Helm et al. (2011) propone un MDP con el fin de reducir la variabilidad de la ocupación de un hospital mediante el control de la admisión de pacientes. Sin embargo, su análisis no se enfoca en la identificación de políticas de gestión para un sistema multihospitalario. Sí lo hacen Chao et al. (2003a) y Chao et al. (2003b), al desarrollar un modelo MDP que ayuda a gestionar el flujo de pacientes entre hospitales de una red público-privada en Hong Kong dependiendo de la congestión del sistema. Sin embargo, de modo de hacer el problema tratable, su análisis considera solamente dos hospitales y dos tipos de pacientes que no requieren necesariamente atención inmediata (es decir, que pueden esperar a ser atendidos). Además, la definición de tipos de pacientes se hace solamente de forma geográfica y el objetivo es minimizar los tiempos de espera de cada paciente.

Hu et al. (2018) consideran un único hospital y determinan, dependiendo del riesgo de deterioración de los pacientes, cuándo transferir proactivamente pacientes desde la sala general y una sala de atención transitoria hacia la UCI. Los autores concluyen que un uso prudente de transferencias proactivas podría reducir las tasas de mortalidad y los tiempos de espera sin aumentar el número de ocurrencias de otros eventos adversos.

Finalmente, Hailemariam (2016) en su tesis doctoral describe un modelo Semi-MDP de control de admisiones de pacientes para un sistema de hospitales en Estados Unidos, el cual permite decidir cuándo admitir pacientes en el sistema y cuándo transferirlos. Sin embargo, su enfoque no es centralizado como el propuesto en esta tesis ya que las decisiones se toman solamente desde un hospital, y el autor no considera la posibilidad de derivar pacientes a un hospital privado como forma de reducir el estrés de la red. Además, el autor clasifica a los pacientes simplemente en pacientes urgentes y no urgentes, lo que es menos detallado que la clasificación utilizada en esta tesis. De esta forma, el autor no permite diferenciar a los pacientes por diagnóstico según sus largos de estadía. Por ende, el modelo propuesto por el autor no ofrece una solución al problema de dimensionalidad que suele surgir cuando se trabaja con problemas de tamaño práctico.

Como se puede inferir de lo expuesto respecto a la relación entre diversas unidades de cuidado de un hospital, no existen artículos que consideren proactividad en los movimientos de pacientes entre distintas unidades de distintos hospitales, o de la ocupación de camas de mayor complejidad por pacientes de menor complejidad. Los artículos más similares al respecto son dos. Primero, el de González et al. (2018), quienes proponen el uso de MDPs para generar política de transferencias de pacientes entre las distintas unidades de un hospital. Segundo, el de Grand-Clement et al. (2020), en el que se propone un MDP para evaluar la evolución de salud del paciente y, así, determinar un nivel en el que mover a los pacientes de la sala de emergencia a una UCI. Ambos, después de todo, tratan de que es posible lograr una mejor gestión de la ocupación de las camas, impactando de forma positiva la salud de los pacientes.

Si bien hay muchos otros autores que estudian asuntos relacionados con el flujo interno de pacientes en un hospital (e.g., Vasilakis and El-Darzi, 2001; Koizumi et al., 2005; De Bruin et al., 2007; Bhattacharjee and Ray, 2014; Mathews and Long, 2015; Hulshof et al., 2016), no fue posible encontrar artículos que traten de mejorar la eficiencia del sistema con la cantidad de recursos actualmente existentes. Y mucho menos que consideren decisiones proactivas de admisión, transferencia y derivación considerando varias unidades en una red de hospitales.

2.3.2. Formas de lidiar con la maldición de la dimensionalidad en la literatura

El principal problema de los MDPs es la complejidad que puede llegar a tener resolver problemas de tamaño razonable. A medida que el problema se vuelve más grande, la cantidad de ramas del árbol de decisiones (estados y acciones) que puede llegar a tener un MDP puede crecer exponencialmente. Esto se conoce en la literatura como la “maldición de la dimensionalidad” (Powell, 2011).

Para poder lidiar con esta maldición, que hace altamente difícil resolver este tipo de problemas en forma exacta, es que se han desarrollado métodos de programación dinámica aproximada (ADP, por sus siglas en inglés), que permiten obtener políticas de decisión de

buen desempeño con una reducción significativa en el esfuerzo computacional y analítico que se requiere (Powell, 2011).

Los enfoques para resolver MDPs de forma aproximada son clasificados por Powell (2011) en cuatro categorías. La primera y más simple es la forma miope, que consiste en determinar la política óptima sin considerar el impacto que las decisiones puedan tener sobre el desempeño futuro del sistema. La segunda permite obtener políticas *lookahead*, permitiendo considerar información futura bajo un cierto horizonte truncado de tiempo. La tercera son las aproximaciones de políticas (PFA, por las siglas de su nombre en inglés *policy function approximation*) que simplificar el espacio de búsqueda de decisiones óptimas. Por último, existen las políticas generadas por aproximaciones de la función valor (VFA, por las siglas de su nombre en inglés *value function approximation*), que aproximan la función de valor futuro según cierto vector de recursos y permiten considerar el impacto futuro de una decisión de forma generalmente más sencilla que la exhaustiva.

En particular, en el trabajo presentado en esta tesis se usan enfoques pertenecientes a dos de estas categorías. La primera es la miope, al ser la que mejor representa el proceder actual de la UGCC. La segunda, y la que permite estimar todos los beneficios sociales de esta tesis, es una forma de hacer VFA que fue originalmente introducida por Schweitzer and Seidmann (1985), cuyo uso ha sido exitoso en numerosos estudios en la literatura (de Farias and Roy, 2004, 2006; Adelman, 2004, 2007; Adelman and Mersereau, 2008; Adelman and Klabjan, 2012, entre otros).

En particular, el uso de VFA ha sido aplicado en diversos aspectos del mundo de la salud. Patrick et al. (2008) utilizaron este enfoque para generar políticas de agendamiento de pacientes, con distinta prioridad, a recursos hospitalarios. De esta forma, proponen directrices de cuándo agendar cada grupo de pacientes según su prioridad, y cuándo recurrir al uso de sobrecupo o derivación. Por otro lado, Sauré et al. (2012) generan políticas de agendamiento de tratamientos de radioterapia para pacientes con cáncer. Una política interesante que generan es agendar a cierto tipo de pacientes lo más tarde posible desde un punto de vista clínico, a diferencia de lo intuitivo que sería agendarlo cuanto antes. Bikker

et al. (2018) también usan este enfoque, que les permitió generar políticas para tercerizar la atención de ciertos tipos de pacientes que requieren agendar horas de atención, indicando cuánto tiempo esperar antes de tomar dicha decisión de forma proactiva. También usando esta técnica, Sauré et al. (2020) permiten juntar dos problemas que son interdependientes pero que se suelen tratar por separado. Así, logran generan políticas de agendamiento de horas de atención, junto con determinar cuándo es conveniente agendar la primera sesión de tratamiento para diversos tipos de pacientes. Sauré and Puterman (2017) discuten numerosas otras aplicaciones que esta metodología ha tenido en asuntos de Salud.

2.4. Vacíos en la literatura cubiertos por esta tesis doctoral

Finalmente, es importante recalcar que ninguno de los artículos encontrados en la literatura propone la determinación de políticas de admisión, transferencia y derivación de pacientes en una red de hospitales públicos, considerando tercerización. A diferencia de los artículos citados, el enfoque propuesto en esta tesis permite trabajar con una mayor granularización en la diferenciación de pacientes, al clasificarlos según diagnóstico de acuerdo a los GRDs estándar, que considera un gran número de categorías (Busse et al., 2011; Zapata, 2018). Esto último hace que la solución directa al problema sea imposible para instancias de tamaño real con las metodologías de resolución comunes encontradas en la literatura. Así, la contribución de la tesis corresponde a lo siguiente:

- Generación de políticas de admisión, transferencia y derivación de pacientes que considere simultáneamente: (i) una red de hospitales, (ii) una gran cantidad de clases de pacientes, y (iii) colaboración entre hospitales públicos y privados representada por la externalización de servicios de cuidado.
- Generación de políticas de asignación de camas a lo largo de la red para dos unidades de complejidad (alta o UCI, e intermedia o UTI), en que los pacientes de menor complejidad pueden usar camas de mayor complejidad, ya sea del hospital que le corresponde o de algún otro hospital de la red.

- Una metodología que, además de generar políticas de admisión, transferencia y derivación, permite determinar el valor de una cama adicional en cada uno de los hospitales de la red. Esto aporta particularmente a la literatura relacionada con expansión de capacidad.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Consideremos un sistema de hospitales públicos. Para cada hospital, aquellas atenciones que requieren hospitalización pueden iniciarse de dos formas. La primera es a través de Urgencia, en la que el paciente que no estaba siendo esperado debe ser atendido de todas formas dado su nivel de gravedad; y la segunda es a través del sistema de admisión, en la que el paciente tiene agendada una hora para alguna operación compleja. Independiente del caso, una vez estabilizado el paciente tras su atención de Urgencia o su cirugía agendada, surge un requerimiento por una cama crítica en alguna unidad crítica del hospital. Concentrémonos en la UCI, que considera pacientes que requieren de cuidados de alta complejidad y que, por lo mismo, cuenta con camas más complejas en términos de equipamiento médico. La Figura 3.1 ilustra el proceso de un requerimiento de cama UCI.

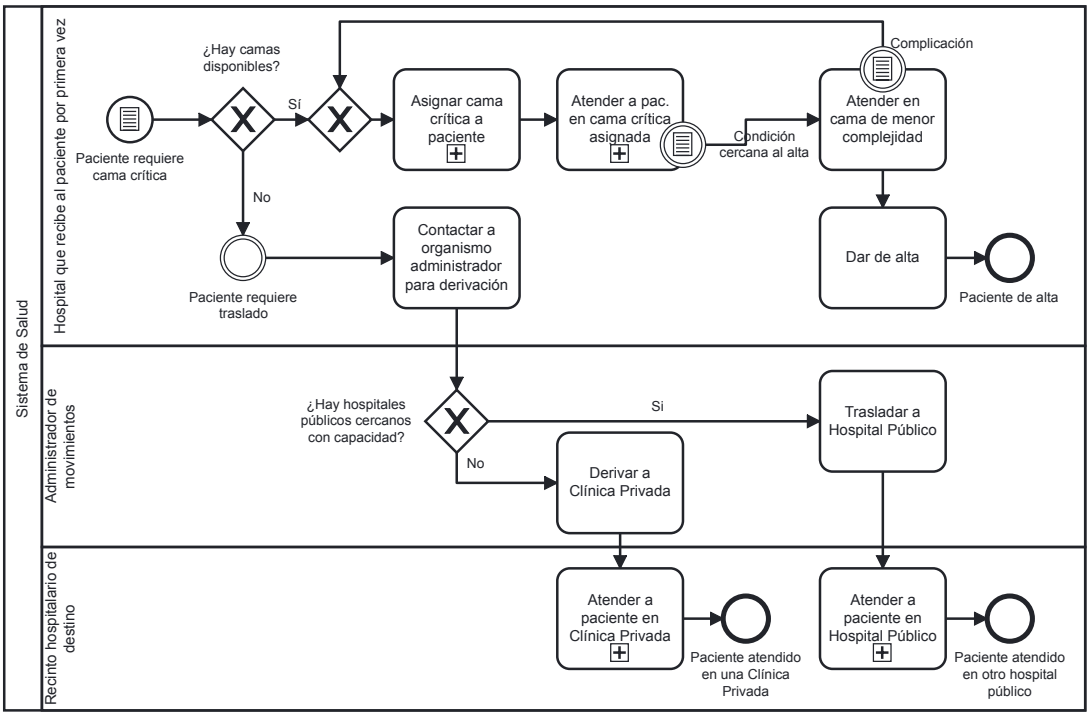


Figura 3.1. Diagrama del proceso de requerimiento de una cama crítica.
Fuente: Elaboración propia.

Si el hospital que estabilizó al paciente tiene camas disponibles para hospitalizarlo, entonces se le suele asignar la cama de la UCI correspondiente, en la cual se queda recibiendo atención hasta que esté cerca del alta. En ese momento, es movido a una cama de menor complejidad (por ejemplo, una cama de Sala) hasta que sea dado de alta si es que no empeora su situación.

El desafío está en el caso en que el hospital no cuente con camas en la UCI para hospitalizar al paciente. En ese caso, entra en juego un organismo administrador de movimientos de pacientes. Este organismo vela por que el paciente sea atendido en algún hospital del sector público, idealmente cercano al actual. Sin embargo, en el caso de que ningún hospital cercano cuente con camas disponibles para atender al paciente, es necesario derivarlo al sector privado para que reciba atención. Como es de imaginar, esta atención es mucho más cara (Pepper et al., 2013), por lo que siempre se busca evitar. Sin embargo, la capacidad de atención con las que cuentan los sistemas de salud –en particular el chileno– suele ser limitadas. Ese factor y el hecho de la gran variabilidad existente en la demanda por camas UCI, hacen que sea necesario contar con algún procedimiento que permita atender a aquellos pacientes críticos a los que el sistema no puede atender por sobredemanda.

3.1. Problema de capacidad y transferencias

En el mundo de la gestión de la Salud, cada paciente es distinto y, por lo tanto, debe ser tratado de forma distinta. Esto es conocido como la variabilidad natural del sistema (Joosten et al., 2009). Sin embargo, en el mundo de la gestión de la salud existe una categorización de pacientes de acuerdo a su diagnóstico que permite agruparlos de cierta manera. Estas categorías se conocen como Grupos Relacionados de Diagnóstico (GRDs), y en su nivel más refinado son 1 175 categorías (Berlinguet et al., 1983). Estas categorías permiten agrupar a los pacientes según ciertos comportamientos esperados y atención requerida. Así, por un lado, cada GRD tiene una frecuencia de requerimiento de cama crítica distinto, como ocurre con los casos de pacientes con problemas endocrinos, que son menos frecuentes que los casos de problemas respiratorios. Por otro lado, cada GRD tiene

un largo de estadía distinto, como en el caso de pacientes con problemas en el sistema nervioso, que podrán estar mucho más tiempo ocupando una cama crítica que pacientes con problemas en el sistema digestivo.

Dada las capacidades limitadas de atención de cada uno de los hospitales del sistema, y la poca flexibilidad operacional en la variación de la oferta de recursos (camas) por hospital, es necesario determinar una forma eficiente de usar camas del sistema, incluyendo movimientos de pacientes. Un paciente que ocupe una cama crítica por 5 días genera menos congestión que un paciente que ocupe la misma cama por 15 días. Así, dada la población a la que suele atender cada uno de los hospitales, y las diferencias en requerimientos de los GRDs, es natural pensar que hay hospitales que podrían ser más demandados que otros hospitales.

Dado lo anterior, uno puede cuestionar si realmente es la mejor política transferir pacientes solamente si ya no se cuenta con camas disponibles. Esta política no considera que, en un sistema con alto nivel de ocupación, el hecho de reaccionar solamente cuando un hospital está saturado podría hacer que la cantidad de traslados sea mayor a si se hubiera evitado la saturación de antemano. Luego, ¿cómo evitar la congestión de mejor manera? Para ello, ¿convendrá transferir pacientes de grupos con corta o con larga estadía promedio? ¿A qué hospital sería ideal transferirlos, considerando distintos niveles de eficiencia resolutiva? Son estas preguntas las que se busca responder en un primer alcance del problema.

Para ello, se asumirá que el proceso de transferencias sigue cierta periodicidad, que las decisiones se toman cada cierta cantidad de horas y se rigen por el ente tomador de decisiones a nivel de sistema. Por ejemplo, para el caso chileno esta entidad es la UGCC. La Figura 3.2 ilustra el proceso secuencial de la toma de decisiones de ingreso y transferencia de pacientes si estas se tomaran cada 24 horas, en que al inicio del día un hospital ya tiene una cantidad de pacientes de cierto grupo internados, y ha acumulado una cierta cantidad de pacientes de ese grupo que requieren de ingreso en una UCI. Con esa información en mano, se toma la decisión de admisión, transferencia y derivación de pacientes al inicio

del día para. A lo largo de ese día llegarán pacientes, generando la cantidad de pacientes a ubicar del día siguiente; y se dará de alta a cierta cantidad de pacientes, modificando la cantidad de pacientes internados al inicio del día siguiente.

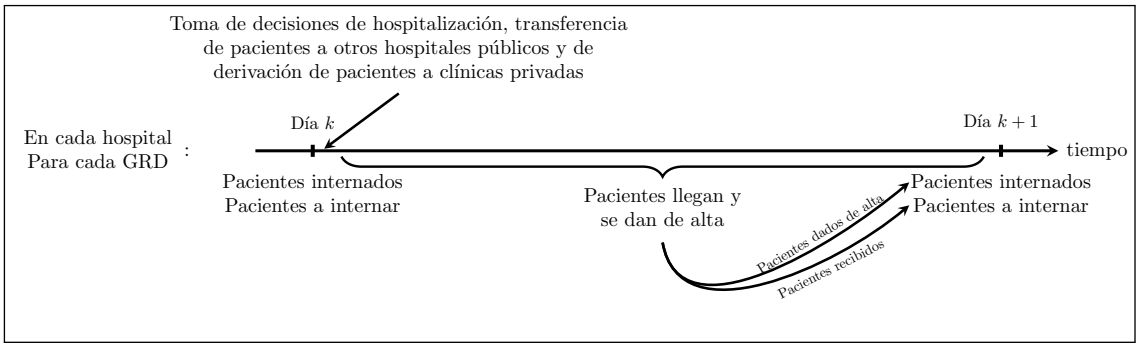


Figura 3.2. Diagrama de la secuencialidad del proceso de la toma de decisiones que rige el problema de la tesis.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Problema considerando UCIs y UTIs

Hay quienes podrían considerar que, junto con las camas de las UCIs, las de las UTIs también son camas críticas. Estas unidades presentan camas críticas de menor especialización, al estar ubicadas en unidades de menor complejidad. Por lo mismo, y dado que las camas críticas de UCI presentan una mayor especialización, es *posible* que un paciente crítico que solamente requiera atención de UTI ocupe una cama en la UCI. Si bien esta situación puede ser poco frecuente, ante situaciones de alta demanda en que todas las camas de la UTI estén ocupadas, puede ser necesaria dicha ocupación para evitar descuidar de la atención de pacientes que requieren de una cama inmediata. Por lo mismo, en un segundo problema de esta tesis doctoral se estudia la conveniencia de que pacientes que requieren solamente de cuidados de UTI ocupen las camas de la UCI. ¿Será beneficioso que camas de unidades de otras complejidades se intenten ocupar solamente cuando la actual está llena? ¿Será conveniente permitir derivaciones a otros hospitales del sistema público (y a otros niveles de complejidad)?

Por otro lado, en Chile actualmente se ha comenzado a hacer gestión de cuidados medios y básicos, derivando a pacientes con este tipo de requerimientos a clínicas privadas según licitación, similarmente a como se ha estado haciendo con los pacientes de alta complejidad (Ministerio de Salud de Chile, 2019). De esta forma, se producen los mismos cuestionamientos que para el problema anterior. ¿No convendrá realizar movimientos de forma tal que se disminuya la cantidad de pacientes, tanto UCI como UTI, que terminan siendo derivados al sector privado? Para un conjunto de hospitales con distintos niveles de ocupación, ¿qué será preferible transferir a otro hospital público, a pesar de que se tenga capacidad para recibirlos? ¿Y a qué hospital?

3.3. Problema de expansión de capacidad

Por último, volveremos al estudio de la capacidad de atención para los pacientes de UCIs. Sin embargo, ahora consideraremos una modificación en la cantidad de recursos. Se buscará definir políticas de aumento de capacidad UCI para una red de hospitales. Las preguntas que se buscan responder para este problema son: ¿Se puede determinar cuál es el valor de una cama adicional en el sistema? ¿Se puede determinar en qué establecimiento genera más valor esta cama adicional? ¿Existirá una metodología que, al mismo tiempo de estar generando políticas de movimiento de pacientes, pueda generar políticas de expansión de capacidad?

4. ENFOQUE DE SOLUCIÓN

Los problemas descritos en el capítulo anterior fueron resueltos usando el mismo enfoque de solución, el cual es presentado en esta sección.

4.1. Proceso de decisión markoviana

Como pudo notarse en la Figura 3.2, el proceso de toma de decisiones de hospitalización y transferencia de pacientes sigue un carácter secuencial. Es por esto mismo que se emplea una metodología de programación dinámica estocástica, conocida en la literatura como Proceso de Decisión Markoviano (MDP).

Basados en la secuencialidad del proceso de toma de decisiones, e independiente de qué problema de los presentados se esté resolviendo, la formulación del MDP es similar:

- Las decisiones se tomarán a lo largo de un horizonte infinito de tiempo.
- El conjunto de todos los estados en los que el sistema puede estar es S. Un estado $\mathbf{s} \in S$ quedará definido por el censo de cada hospital en cada período, junto con la demanda de pacientes que requieren atención en cada período para ese hospital.
- Las acciones a realizar, definidas por el vector $\mathbf{a}$, determinan los pacientes que se hospitalizarán en el mismo lugar donde se levantó el requerimiento, el movimiento de pacientes entre hospitales públicos (que serán referidos como “transferencias”), y el movimiento de pacientes que no serán atendidos en el sector público sino que por el sector privado (que serán referidos como “derivaciones”).
- Las acciones a realizar estarán definidas por el espacio de acciones factibles para cada estado, $A_{\mathbf{s}}$. Este está definido por restricciones relacionadas con la capacidad de los hospitales, la satisfacción de toda la demanda, y las limitantes de movimientos entre hospitales (por ejemplo, hospitales que no tienen el equipo o especialización para atender a cierto grupo, o trayectos muy largos) o de ocupación de camas (por ejemplo, que pacientes con nivel de complejidad de UCI no pueden ocupar camas de menor complejidad, como las de UTI).

- Las probabilidades de transición hacia un estado $\mathbf{s}'$ cuando el sistema está en un estado $\mathbf{s} \in S$ y se toma la acción $\mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}$, denotadas como $p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a})$, están definidas por dos variables aleatorias con sus respectivas distribuciones. Estas son la distribución asociada a la cantidad de pacientes que levantarán un requerimiento de una cama crítica durante el período entrante, y a la cantidad de pacientes en el sistema que serán dados de alta o, lamentablemente, fallecen. Cabe destacar que se considera que un paciente levanta un requerimiento de demanda por una cama cuando es categorizado como crítico y estable (y, por ende, trasladable).
- Los costos inmediatos asociados con tomar una acción $\mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}$ en el estado $\mathbf{s} \in S$, denotados como $c(\mathbf{s}, \mathbf{a})$, corresponden a los costos de atención en el sector público, los costos de ambulancia para trasladar pacientes entre recintos hospitalarios (públicos y/o privados), y el costo de atención en el sector privado.
- La tasa de actualización del costo es $\gamma < 1$.

La función de valor, o *value-to-go* (*cost-to-go* en este caso), de la formulación MDP será denotada como $v_t(\mathbf{s})$ para el período o etapa t, y corresponde al mínimo costo total esperado descontado, si el sistema está inicialmente en el estado s. Si la formulación del MDP es tal que

- la función $c(\mathbf{s}, \mathbf{a})$ y las probabilidades de transición $p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a})$ no dependen de la etapa del sistema,
- la función $c(\mathbf{s}, \mathbf{a})$ es finita $\forall \mathbf{s} \in S$ y $\forall \mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}$,
- los costos futuros son descontados a una tasa γ que cumple $0 \leq \gamma < 1$,
- el espacio de estados S es finito y contable, y
- el espacio de acciones factibles en un estado, $A_{\mathbf{s}}, \forall s \in S$, es finito,

entonces el valor de $v_t(\mathbf{s})$ para una etapa o período t es posible calcularlo a través del sistema de ecuaciones conocido como ecuaciones de Bellman (Puterman, 2005):

$$v_t(\mathbf{s}) = \min_{\mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}} \left\{ c(\mathbf{s}, \mathbf{a}) + \gamma \sum_{\mathbf{s}' \in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a}) v_{t+1}(\mathbf{s}') \right\} \qquad \forall \mathbf{s} \in S, \tag{4.1}$$

Dado que en realidad se necesita que la función de valor indique el mínimo costo total esperado, descontado en un horizonte de tiempo infinito, se obtiene el costo buscado aplicando límite a (4.1).

$$v(\mathbf{s}) = \lim_{t\to\infty} v_t(\mathbf{s}) \qquad \forall \mathbf{s} \in S$$

Así, las ecuaciones para determinar $v(\mathbf{s})$ vienen dadas por

$$v(\mathbf{s}) = \min_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}} \left\{ c(\mathbf{s},\mathbf{a}) + \gamma \sum_{\mathbf{s}'\in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s},\mathbf{a}) v(\mathbf{s}') \right\} \qquad \forall \mathbf{s} \in S. \tag{4.2}$$

Dependiendo de la formulación del problema, puede ser realmente complejo resolver el sistema de ecuaciones en (4.2) mediante el uso de métodos tradicionales de programación dinámica (Schweitzer and Seidmann, 1985), debido a lo que se conoce como la "maldición de la dimensionalidad" (Powell, 2011). Para ilustrar esta complejidad, el tamaño del ejemplo pequeño que se verá en la Sección 5.1 es de aproximadamente 10^{61} estados, mientras que la cantidad aproximada de acciones posibles es 10^{41}.

Por lo tanto, el enfoque propuesto en esta tesis se basa en escribir las ecuaciones de optimalidad como un problema de programación lineal equivalente (Puterman, 2005),

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{\mathbf{s}\in S} \alpha(\mathbf{s}) v(\mathbf{s}) \\ \text{s.a} \quad & c(\mathbf{s},\mathbf{a}) + \gamma \sum_{\mathbf{s}'\in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s},\mathbf{a}) v(\mathbf{s}') \geq v(\mathbf{s}) \qquad \forall \mathbf{s} \in S, \mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}} \ , \end{aligned} \tag{4.3}$$

en que $\alpha(\mathbf{s}) > 0$ son escalares que corresponden al peso del estado $\mathbf{s} \in S$ en la función objetivo. Se asumirá que $\sum_{\mathbf{s}\in S} \alpha(\mathbf{s}) = 1$ para así interpretar $\alpha(\mathbf{s})$ como la distribución de probabilidades del estado inicial del sistema.

4.2. Resolución a través de programación dinámica aproximada

La dificultad de resolver (4.3) es que tiene $|S|$ variables y una restricción por cada par factible $(\mathbf{s},\mathbf{a}), \mathbf{s} \in S$ y $\mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}$, por lo que el problema de la dimensionalidad persiste. Por

eso, la metodología propuesta se basa en la aproximación lineal propuesta por Schweitzer and Seidmann (1985) para la función valor. Estos autores proponen aproximar la función valor $v(\mathbf{s})$ mediante un polinomio paramerizado por M características que representen al estado

$$v(\mathbf{s}) \simeq \sum_{m=1}^{M} b_m f_m(\mathbf{s}) \qquad \forall \mathbf{s} \in S,$$

en que las funciones f_m representan del estado, y los parámetros b_m se deben ajustar para dar un buen calce.

En particular, el formato de la aproximación de $v(s)$ usado en esta investigación doctoral para lograr reducir la dimensionalidad del problema de $|S|$ a M, es una estructura lineal afín, también usado por varios autores de forma exitosa en la literatura (de Farias and Roy, 2004, 2006; Adelman, 2004, 2007; Adelman and Mersereau, 2008; Patrick et al., 2008; Sauré et al., 2012; Adelman and Klabjan, 2012; Sauré and Puterman, 2017; Bikker et al., 2018; Sauré et al., 2020):

$$v(\mathbf{s}) \simeq \beta + \sum_{m=1}^{M} b_m f_m(\mathbf{s}) \quad \forall \mathbf{s} \in S, \tag{4.4}$$

$$\mathbf{b} \geq 0, \beta \in \mathbb{R}.$$

Para la propuesta de esta tesis, las M características estarán dadas por la ocupación del hospital y la demanda que debe ser atendida, es decir, las variables de estado del modelo.

Al utilizar esta aproximación en (4.3), se puede llegar a un problema de optimización que, si bien reduce la cantidad de variables a $M+1$, sigue presentando una cantidad intratable de restricciones. Por lo mismo, la metodología de resolución usada es generación de columnas sobre el problema dual. Si se sigue la estructura de formulación descrita anteriormente, esta metodología tendrá propiedades de integralidad al ser un problema de flujo en redes. Por lo tanto, a pesar de que el dual cuente con muchas variables (dependiendo de la cantidad de características), aún así podrá ser resuelto en tiempos razonables para instancias prácticos si es que se relaja la integralidad de las variables.

Al finalizar el algoritmo de generación de columnas, se obtendrán los parámetros $\{b_m^*\}_{m=1}^M$ y β^* que mejor ajustan la función valor. Es decir, con estos valores se puede obtener –de forma aproximada– el costo futuro descontado para cada estado. Si se reemplazan los valores óptimos $\{b_m^*\}_{m=1}^M$ y β^* en el lado derecho de (4.2), es posible llegar al problema determinístico que permite obtener la *política óptima aproximada* (AOP), $\mathrm{d}^*(\mathbf{s})$, de la siguiente forma:

$$\mathrm{d}^*(\mathbf{s}) \in \arg\min_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}} \left\{ \mathbf{A}^\top \mathbf{a} + \mathrm{cte} \right\}.$$

Así, se tiene una forma *offline* de optimizar los costos futuros del MDP, que a su vez evita tener que registrar las acciones óptimas aproximadas para cada estado. Gracias a esta metodología, esa laboriosa tarea puede ser reemplazada por determinar las políticas (acciones óptimas) a medida que se van necesitando.

5. APLICACIONES

5.1. Transferencias interhospitalarias de pacientes que requieren UCI por sector

En esta sección se mostrará cómo se desarrolla el enfoque de solución para el primer problema ilustrado en el Capítulo 3: transferencia interhospitalaria de pacientes que tienen requerimientos de camas UCI. Por lo mismo, esta sección ilustrará el camino tomado para responder las preguntas asociadas: ¿Permite la metodología propuesta en el Capítulo 4 obtener políticas de movimientos proactivos para una red de UCIs? ¿La proactividad en estos movimientos genera beneficios económicos? ¿Es posible que la política indique a qué tipo de pacientes es conveniente transferir o derivar, y a dónde?

5.1.1. Formulación instanciada

A continuación, se describirá el problema a modelar, instanciando las épocas de decisión, los estados, las acciones, las transiciones y todo lo necesario para definir el problema. Se considera una red con H hospitales públicos que tienen UCIs (en adelante, simplemente "hospitales") que proveen servicio a pacientes clasificados en G grupos relacionados de diagnóstico (GRDs), cada uno con tasas de llegada y largos de estadía potencialmente distintos. Asímismo, un paciente del mismo grupo podría tardar distinto en ser dado de alta dependiendo del hospital, dada la existencia de niveles distintos de especialización. El hospital h tiene una cantidad de camas críticas K_h en su UCI, que define su capacidad para admitir pacientes, dado el hecho de que una cama puede estar ocupada solamente por un paciente en cada instante. Además, existe un conjunto de P recintos privados (en adelante, simplemente "clínicas") que pueden recibir una cantidad prácticamente ilimitada de pacientes de cualquier grupo. Se asume que todo paciente que necesita atención en una cama crítica es transferible y debe ser atendido en algún recinto, ya sea público o privado.

Se asume que los pacientes ocupan capacidad de UCIs sólo a partir del momento en que son internados en alguna UCI y no antes; que un paciente, una vez internado, se quedará en la misma cama hasta que es removido de la UCI (en adelante, simplemente

"dado de alta"); y que los tiempos de setup de camas recién desocupadas o los tiempos de transferencias son despreciables, pues estos son mucho menores que el largo de un período de toma de decisiones. Además, se considera que una unidad de demanda se genera sólo cuando un paciente crítico y estable (y, por ende, transferible) requiere una cama crítica para su cuidado. Por último, es importante mencionar que el administrador central (UGCC para el caso en cuestión) solamente puede tomar decisiones asociadas a la transferencia y derivación de pacientes, dejando las decisiones médicas (como el alta de los pacientes) a cada hospital.

5.1.1.1. Épocas de decisión

Las decisiones de admisión, transferencia y derivación de pacientes se toman al inicio de cada día en un horizonte de tiempo infinito, ya que se busca determinar políticas estacionarias de decisión y no acciones a tomar en un horizonte fijo particular. El intervalo de tiempo entre dos épocas de decisión consecutivas podría ser un par de horas o más, sin afectar el enfoque de solución propuesto.

5.1.1.2. Espacio de estados

Al momento de tomar las decisiones, la red de hospitales se encuentra en un estado $\mathbf{s} \in S$ que está definido por la cantidad de camas UCI ocupadas y la cantidad de pacientes que requieren el uso inmediato de una cama crítica. Con el fin de mantener un número finito de estados, el modelo considera una estadía máxima de L períodos para todo tipo de pacientes, suficientemente grande. Por lo tanto, un estado del sistema queda definido por

$$\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) = \Big(u_{111}, \ldots, u_{HGL}; d_{11}, \ldots, d_{HG}\Big),$$

en que $u_{hgl} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde a la cantidad de pacientes en el hospital h del GRD de código g (en adelante, simplemente "grupo g") que han completado l días de estadía, y $d_{hg} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde a la cantidad de pacientes del grupo g que llegaron al hospital h durante el último día y que requieren una cama crítica en algún recinto. Los estados con

$l = L$ son definidos como la cantidad de pacientes que han completado al menos L días de estadía.

Notemos que la componente u_{hgl} está limitada superiormente por el número de camas K_h disponibles en el hospital h. A su vez, la componente d_{hg} se asume acotada por un número mucho menor que el tamaño de la población a la que la red de hospitales sirve. De este modo, S incluye un conjunto finito de estados.

Dada la naturaleza del problema, no todos los estados potenciales son factibles. Como los hospitales poseen un número limitado de camas críticas, las componentes u_{hgl} de los estados deben satisfacer que $\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L} u_{hgl} \leq K_h, \forall h$.

5.1.1.3. Conjunto de acciones

Al inicio de cada día, el tomador de decisiones (administrador central) debe decidir sobre la admisión y el flujo de pacientes entre hospitales públicos y hacia centros privados. Así, cada acción disponible estará dada por un vector

$$\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z}) = (y_{111}, \ldots, y_{HGP}; z_{111}, \ldots, z_{HHG}),$$

en que $y_{hgp} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde al número de pacientes del grupo g trasladados desde el hospital h a la clínica p, $z_{hig} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde al número de pacientes del grupo g trasladados desde el hospital h al hospital i (con $i \neq h$), y $z_{hhg} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde al número de pacientes del grupo g que son internados en el hospital h al que llegaron en primera instancia (es decir, sin una transferencia involucrada).

Es importante notar que todas las componentes de una acción están restringidas por la demanda por servicio médico. Así, el conjunto de acciones factibles para un estado $(\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S$, denotado como $A_{(\mathbf{u},\mathbf{d})}$, debe satisfacer la condición de que todos los pacientes que llegan a un hospital deben ser internados o trasladados a otro recinto, ya sea público o

privado. Esto implica que

$$d_{hg} = \sum_{i=1}^{H} z_{hig} + \sum_{p=1}^{P} y_{hgp} \qquad \forall h, g. \tag{5.1}$$

Las acciones disponibles también deben satisfacer la restricción (5.2), que limita la cantidad de pacientes a internar y los movimientos de pacientes asociados a cada hospital, de modo de respetar su capacidad. Para ello, para cada hospital, la cantidad de pacientes internados previamente y que no han dejado el sistema, más los que llegaron en el último período buscando atención, más aquellos que fueron recibidos e internados el último período viniendo desde otros hospitales, menos los que fueron transferidos a otros hospitales y los derivados al sector privado debe ser menor o igual que la capacidad de cada hospital:

$$\sum_{g=1}^{G} \left[\sum_{l=1}^{L} u_{hgl} + \underbrace{\left(d_{hg} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{H} z_{ihg} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{H} z_{hig} - \sum_{p=1}^{P} y_{hgp} \right)}_{\substack{\text{Cantidad de pacientes del grupo } g \text{ que} \\ \text{se decide internar en el hospital } h}} \right] \leq K_h \qquad \forall h. \tag{5.2}$$

La notación utilizada permite definir el número total de pacientes del grupo g que se decide internar en el hospital h, independiente de dónde hayan llegado originalmente, como $\sum_{i=1}^{H} z_{ihg}$.

Otro factor que condiciona las acciones posibles es que pueden haber redes de hospitales en los que haya algunas admisiones y/o transferencias no permitidas. Por ejemplo, pueden haber hospitales que no cuentan con los recursos médicos (ya sea especialistas o equipos) para atender a ciertos grupos de diagnóstico, o redes que no permiten transferencias entre hospitales demasiado lejanos o de pacientes con diagnóstico de alto riesgo. Todas estas acciones no factibles pueden ser reflejadas en la siguiente restricción:

$$z_{hig} = 0 \qquad \forall (h, i, g) \in \mathcal{M}, \tag{5.3}$$

en que $\mathcal{M}$ es el conjunto de tríos de índices que tienen asociado una internación o transferencia no permitida.

5.1.1.4. Probabilidades de transición

Si se está en el estado $\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S$ y se toma la acción $\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z}) \in A_{(\mathbf{u},\mathbf{d})}$, la transición al siguiente estado del sistema depende de dos grupos de variables aleatorias: q_{hg}, que representa la cantidad de pacientes del grupo g que llegan directo al hospital h durante un día; y r_{hgl}, que corresponde a la cantidad de pacientes de grupo g y largo de estadía l que dejan el hospital h de forma diaria. Esta última variable aleatoria se define así pues las tasas con las que diferentes grupos de pacientes son dados de alta generalmente dependen de la cantidad de días que los pacientes llevan internados, y sigue una distribución de probabilidad Binomial($\hat{u}_{hgl}, \rho_{hgl}$), donde $\hat{u}_{hg1} = \sum_{i=1}^{H} z_{ihg}$, $\hat{u}_{hgl} = u_{h,g,l-1}\ \forall l : 1 < l < L$, $\hat{u}_{hgL} = u_{h,g,L-1} + u_{hgL}$, y ρ_{hgl} es la probabilidad de que un paciente del grupo g abandone el hospital h luego de l períodos desde su llegada, la cual puede ser obtenida a partir de la distribución de tiempo de estadía. Para que una instancia del modelo sea realista, el valor de L debe ser suficientemente grande para que, independiente del grupo y hospital, la probabilidad de que un paciente abandone la UCI no cambie si él o ella se mantiene en el sistema por L o más días. Así, el enfoque de solución propuesto permite tratar con distribuciones genéricas de llegada de pacientes y de tiempos de servicio. A pesar de que el tiempo de estadía de un grupo específico de pacientes puede variar entre hospitales, se asume que los hospitales proveen la misma calidad de atención y, por ende, tiene el mismo resultado en sus pacientes. Si realmente hay diferencias en la calidad del cuidado, se podría considerar penalizando el largo de estadía correspondientemente.

De esta forma, las probabilidades de transición que determinan el estado del sistema en el siguiente período, denotado por $\mathbf{s}' = (\mathbf{u}', \mathbf{d}')$, están dadas por:

$$p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a}) = \begin{cases} \prod_{h=1}^{H} \prod_{g=1}^{G} \prod_{l=1}^{L} \mathbb{P}(q_{hg}) \mathbb{P}(r_{hgl}|\mathbf{s}, \mathbf{a}), & \text{si } \mathbf{s}' \text{ satisface las restricciones (5.4)-(5.7);} \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

$$u'_{h,g,1} = d_{hg} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{H} z_{ihg} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{H} z_{hig} - \sum_{p=1}^{P} y_{hgp} - r_{h,g,0} \qquad \forall h, g. \quad (5.4)$$

$$u'_{h,g,l} = u_{h,g,l-1} - r_{h,g,l-1} \qquad \forall h, g, l : 2 \leq l \leq L-1. \quad (5.5)$$

$$u'_{h,g,L} = u_{h,g,L-1} - r_{h,g,L-1} + u_{h,g,L} - r_{h,g,L} \qquad \forall h, g. \quad (5.6)$$

$$d'_{hg} = q_{hg} \qquad \forall h, g. \quad (5.7)$$

Acá, las ecuaciones (5.4)-(5.6) determinan el número de pacientes en cada hospital por largo de estadía. Además, las ecuaciones (5.7) definen la cantidad de pacientes que llegaron a cada hospital durante el último período y que hay que distribuir entre los diferentes recintos hospitalarios.

5.1.1.5. Costos inmediatos

Tomar una acción $\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z}) \in A_{(\mathbf{u},\mathbf{d})}$ en el estado $\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S$ tiene un costo asociado a la transferencia de pacientes entre hospitales públicos (e.g., ambulancia), tratamiento completo en los hospitales, y a la derivación y atención completa en alguna clínica privada. Por lo tanto, el costo inmediato total puede ser representado por

$$c(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{p=1}^{P} k_{hgp} y_{hgp} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{i=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} f_{hig} z_{hig} \quad \forall (\mathbf{s}, \mathbf{a}) : \mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}, \mathbf{s} \in S,$$

donde f_{hig} es el costo de transferir y atender a un paciente del grupo g desde el hospital h al hospital i, y k_{hgp} es el costo de transferir y atender a un paciente del grupo g desde el hospital h a una clínica p. Estos costos también podrían reflejar cualquier diferencia en la calidad del cuidado recibido por un paciente atendido en otro hospital.

Sin embargo, notemos que dado que es posible asumir que el costo de atender a un paciente de cierto grupo es el mismo para cualquier hospital público, esta componente del costo es una constante. Así, se le puede asignar el valor de cero, es decir $f_{hhg} = 0$, para que el costo de transferencia hospitalaria $f_{hig}, h \neq g$ considere solamente el costo de

transporte[1]. Para el caso del costo de derivación a clínicas, k_{hgp}, estos pueden ser considerados como qué tanto más caro es transferir y atender a un paciente del grupo g que llegó al hospital h en el sistema privado, es decir, el costo adicional.

5.1.1.6. Ecuaciones de optimalidad

La función de valor de este MDP define el mínimo costo total esperado, descontado en un horizonte de tiempo infinito. Este valor lo denotamos por $v(\mathbf{s})$ para el estado $\mathbf{s}$. Entonces, para identificar la política estacionaria óptima se requiere resolver las siguientes ecuaciones de Bellman:

$$v(\mathbf{s}) = \min_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}} \left\{ c(\mathbf{s},\mathbf{a}) + \gamma \sum_{\mathbf{s}'\in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s},\mathbf{a}) v(\mathbf{s}') \right\} \qquad \forall \mathbf{s} \in S, \tag{5.8}$$

donde γ es el factor de descuento diario. Estas ecuaciones permiten determinar el valor para cada estado al encontrar una acción factible que minimiza el costo inmediato y futuro esperado descontado y, por ende, capturar el impacto que las decisiones tienen en el futuro.

Para dimensionar la complejidad de la resolución del sistema de ecuaciones en (5.8), a continuación se presenta la cantidad de estados y acciones del modelo resultante. Por un lado, la variable de estado $\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d})$ tiene $HGL + HG$ dimensiones. Si la cantidad máxima de pacientes de cada grupo que puede llegar a cada hospital en forma diaria es D, entonces la cantidad de estados distintos[2] puede ser hasta $\prod_{h=1}^{H} \binom{GL+K_h}{K_h} \times (D+1)^{HG}$. Por otro lado, la variable de acción $\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z})$ tiene $(HGP + H^2G)$ dimensiones. Como se puede transferir o derivar máximo la cantidad de pacientes que se recibe, el modelo puede llegar a tener hasta $(D+1)^{HGP+H^2G}$ acciones (aunque no todas necesariamente factibles). En particular, incluso para el ejemplo pequeño que se presentará la Subsección 5.1.3 no es posible resolver (5.8), pues esa instancia del problema tiene alrededor de 10^{61} estados

[1] De no ser así, basta con sumar a cada componente f_{hig} el costo completo de atención asociado con el grupo g en el hospital i

[2] Notemos que si en un hospital se tienen g grupos de pacientes y k camas en total, la cantidad de combinaciones en que se puede encontrar es $\binom{g+k}{k}$.

y 10^{41} acciones posibles. Así, claramente la resolución directa de este problema, incluso para instancias muy pequeñas, es prácticamente imposible.

5.1.2. Lidiando con la maldición de la dimensionalidad

Al llevar el MDP recién planteado a un modelo de programación lineal como (4.3), se obtiene un modelo que tiene una variable por cada estado y una restricción por cada par $(\mathbf{s}, \mathbf{a})$ factible, $\mathbf{s} \in S$ y $\mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}$, por lo que el problema con la dimensionalidad del modelo aún persiste. Para solucionarlo, se usará la aproximación afín propuesta en el Capítulo 4 para representar $v(\mathbf{u}, \mathbf{d})$ mediante su correspondiente aproximación afín en las variables de estado:

$$v(\mathbf{u}, \mathbf{d}) = \beta + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{l=1}^{L} U_{hgl} u_{hgl} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} D_{hg} d_{hg}, \quad \forall \mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S, \tag{5.9}$$
$$\mathbf{U}, \mathbf{D} \geq 0, \beta \in \mathbb{R}.$$

Los parámetros que definen esta aproximación tienen una interpretación interesante. U_{hgl} representa el costo marginal esperado descontado asociado a tener una cama adicional ocupada por un paciente del grupo g que pasará su l-ésima noche de estadía en el hospital h. Por otra parte, D_{hg} representa el costo marginal esperado descontado asociado con tener a un paciente adicional del grupo g esperando en el hospital h a ser ingresado, transferido o derivado. β, por otra parte, es meramente una variable libre que permite que la función (5.9) sea afín.

Así, es posible reemplazar la función de valor en (4.3) por la aproximación (5.9) y formular el siguiente problema de programación lineal equivalente aproximado (ALP).

$$\begin{aligned} ALP) \quad \max_{\mathbf{U},\mathbf{D},\beta} \quad & \beta + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{l=1}^{L} \mathbb{E}_{\alpha}[u_{hgl}] U_{hgl} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \mathbb{E}_{\alpha}[d_{hg}] D_{hg} \\ \text{s.a} \quad & (1-\gamma)\beta + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{l=1}^{L} \mu_{hgl}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) U_{hgl} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \delta_{hg}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) D_{hg} \leq c(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \quad \forall \mathbf{s} \in S, \mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}} \\ & \mathbf{U}, \mathbf{D} \geq \mathbf{0}, \quad \beta \in \mathbb{R}, \end{aligned} \tag{5.10}$$

donde,

$$\mathbb{E}_\alpha[u_{hgl}] = \sum_{\mathbf{s}\in S} \alpha(\mathbf{s}) u_{hgl}(\mathbf{s}) \quad \forall h, g, l, \qquad \mu_{hgl}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = u_{hgl}(\mathbf{s}) - \gamma \sum_{\mathbf{s}'\in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a}) u'_{hgl}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \quad \forall h, g, l,$$

$$\mathbb{E}_\alpha[d_{hg}] = \sum_{\mathbf{s}\in S} \alpha(\mathbf{s}) d_{hg}(\mathbf{s}) \quad \forall h, g, \qquad \delta_{hg}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = d_{hg}(\mathbf{s}) - \gamma \sum_{\mathbf{s}'\in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a}) d'_{hg}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \quad \forall h, g.$$

Si bien, las $HGL + HG + 1$ variables en (5.10) no presentan mucho problema, sí lo hace la enorme cantidad de restricciones. Como existe una restricción por cada par $(\mathbf{s}, \mathbf{a})$, conviene resolver el dual de (5.10), modelo que será referido como $(DALP)$, usando generación de columnas. En este modelo, $\pi(\mathbf{s}, \mathbf{a})$ representa la variable dual asociada al par estado-acción $(\mathbf{s}, \mathbf{a})$. El pseudo-código correspondiente utilizado se describe en el Algoritmo 1.

$$\begin{aligned} DALP) \quad \min_{\pi} \quad & \sum_{\mathbf{s}\in S} \sum_{\mathbf{a}\in A_\mathbf{s}} c(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \pi(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \\ \text{s.a} \quad & (1-\gamma) \sum_{\mathbf{s}\in S} \sum_{\mathbf{a}\in A_\mathbf{s}} \pi(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = 1 \\ & \sum_{\mathbf{s}\in S} \sum_{\mathbf{a}\in A_\mathbf{s}} \mu_{hgl}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \pi(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \geq \mathbb{E}_\alpha[u_{hgl}] \quad \forall h, g, l \\ & \sum_{\mathbf{s}\in S} \sum_{\mathbf{a}\in A_\mathbf{s}} \delta_{hg}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \pi(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \geq \mathbb{E}_\alpha[d_{hg}] \quad \forall h, g \\ & \pi \geq \mathbf{0}. \end{aligned} \tag{5.11}$$

Algoritmo 1 Generación de columnas

1: Obtener un conjunto inicial de pares estado-acción factible $\mathcal{P}$ usando el enfoque de fase 1 presentado en el Algoritmo 2.
2: Definir e instanciar la variable $PV = \infty$.
3: **mientras** $PV > 10^{-5}$ **hacer**
4: Resolver la versión restringida de (5.11), que considera solamente el conjunto de columnas actual $\mathcal{P}$.
5: Determinar β, $\mathbf{U}$ y $\mathbf{D}$ como los precios sombra de las restricciones duales correspondientes.
6: Resolver (5.12) usando los precios sombras actuales y almacenar el valor objetivo óptimo en PV.
7: **si** $PV > 0$ **, entonces**
8: Elegir el par estado-acción que genera PV.
9: Calcular $\mu(\mathbf{s}, \mathbf{a}), \delta(\mathbf{s}, \mathbf{a})$ y $c(\mathbf{s}, \mathbf{a})$, y considerarlo una columna.
10: Actualizar $\mathcal{P}$ agregando la columna recién calculada.
11: **fin del si**
12: **fin del mientras**

Algoritmo 2 Enfoque de fase 1 para obtener un conjunto inicial de columnas factibles

1: Comenzar con un conjunto de pares estado-acción $\mathcal{P} = \emptyset$.
2: Resolver (5.13) y almacenar el valor objetivo óptimo en z_{master}.
3: **mientras** $z_{master} > 0$ **hacer**
4: Considerar β, $\mathbf{U}$ y $\mathbf{D}$ como los precios sombras de las restricciones duales correspondientes.
5: Resolver (5.14) usando los precios sombras actuales.
6: Seleccionar el par estado-acción obtenido como la solución óptima.
7: Calcular $\mu(\mathbf{s}, \mathbf{a}), \delta(\mathbf{s}, \mathbf{a})$ y $c(\mathbf{s}, \mathbf{a})$, y considerarlo como una columna.
8: Actualizar $\mathcal{P}$ agregando la columna recién calculada.
9: Resolver (5.13), y almacenar el valor óptimo del problema resuelto en z_{master}.
10: **fin del mientras**

Como se puede apreciar, en cada iteración el algoritmo resuelve (5.12), modelo que determina el par estado-acción asociado a una de las restricciones más violadas del primal. Estas iteraciones continúan hasta que ninguna restricción del primal es violada (criterio de parada 10^{-5}).

$$
\begin{aligned}
PrDALP) \quad \max \quad & (1-\gamma)\beta + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L}\mu_{hgl}(\mathbf{s},\mathbf{a})U_{hgl} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\delta_{hg}(\mathbf{s},\mathbf{a})D_{hg} - c(\mathbf{s},\mathbf{a}) \quad (5.12)\\
\text{s.a} \quad & (5.1) - (5.3)\\
& \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{u}, \mathbf{d} \in \mathbb{Z}_0^+.
\end{aligned}
$$

El algoritmo de generación de columnas empieza con el *problema maestro*, $(DALP)$ en (5.11), considerando un pequeño conjunto de pares estado-acción factibles obtenidos con el enfoque de fase 1 presentado en el Algoritmo 2. Este enfoque involucra un proceso iterativo similar, pero considerando los modelos (5.13) y (5.14) en su lugar, hasta que una

solución factible para (5.11) ha sido encontrada. En otras palabras, el algoritmo de fase 1 itera hasta que toads las variables de holgura a^β, a^U_{hgl} y a^D_{hg} en (5.13) sean iguales a cero.

$$\begin{aligned}
\min_{\pi\geq\mathbf{0},\mathbf{a}\geq\mathbf{0}} \quad & a^\beta + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L} a^U_{hgl} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G} a^D_{hg} && && (5.13)\\
\text{s.a} \quad & (1-\gamma)\sum_{p\in\mathcal{P}} \pi_p + a^\beta = 1 && && \\
& \sum_{p\in\mathcal{P}} \mu_{phgl}\pi_p + a^U_{hgl} \geq \mathbb{E}_\alpha[u_{hgl}] && \forall h,g,l && \\
& \sum_{p\in\mathcal{P}} \delta_{phg}\pi_p + a^D_{hg} \geq \mathbb{E}_\alpha[d_{hg}] && \forall h,g. &&
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\max_{\substack{(\mathbf{s},\mathbf{a})\in\\ S\times A_\mathbf{s}}} \quad & (1-\gamma)\beta + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L} \mu_{hgl}(\mathbf{s},\mathbf{a})U_{hgl} \\
& + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G} \delta_{hg}(\mathbf{s},\mathbf{a})D_{hg} && (5.14)
\end{aligned}$$

Es importante notar que la estructura de los problemas (5.12) y (5.14) corresponden al de un problema de flujo en redes a costo mínimo. La demostración de esto se encuentra en el Anexo A.1. Dada esta estructura, y el hecho de que los estados y las capacidades de los hospitales son números enteros, la relajación lineal de (5.12) y de (5.14) tienen la propiedad de integralidad. Se aprovechará esta propiedad para resolver los problemas *pricing* más rápidamente.

El algoritmo entrega como resultado los valores óptimos $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$. Si se reemplaza (5.9), definida por $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$, en el lado derecho de las ecuaciones de Bellman y se ignoran los términos constantes, se llega al siguiente modelo de programación entera, que define la *política óptima aproximada* (AOP):

$$\mathrm{d}^*(\mathbf{s}) \in \arg\min_{\mathbf{a}\in A_\mathbf{s}} \left\{ \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{p=1}^{P} Y_{hgp}y_{hgp} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{H}\sum_{g=1}^{G} Z_{hig}z_{hig} \right\}, \tag{5.15}$$

donde

$$\begin{aligned}
Y_{hgp} &= k_{hgp} - \gamma U^*_{hg1} && \forall h,g,p,\\
Z_{hig} &= f_{hig} + \gamma U^*_{ig1} - \gamma U^*_{hg1} && \forall h,i,g.
\end{aligned}$$

Los coeficientes que definen (5.15), y por lo tanto la AOP, se pueden interpretar intuitivamente de la siguiente manera. Por un lado, tomar una decisión y_{hgp} considera el costo de derivar a un paciente a una clínica k_{hgp} y el beneficio de no tenerlo ingresado en el futuro incurriendo en el costo marginal esperado descontado γU^*_{hg1}. Por el otro, cada

decisión z_{hig} equilibra el costo de transferir un paciente desde el hospital h al hospital i y el costo de que el hospital i se quede con el paciente en el futuro, $f_{hig} + \gamma U^*_{ig1}$, contra el costo futuro marginal descontado de ingresarlo en el hospital h al que llegó, γU^*_{hg1}. Así, en el día a día se puede resolver (5.15) para determinar la acción a tomar, en lugar de registrar la decisión aproximada óptima para cada estado posible, ya que esto último sería prácticamente imposible dado el número de estados que se consideran. (5.15) puede ser implementado y resuelto de forma fácil en menos de un segundo para problemas de tamaño práctico.

El algoritmo de generación de columnas y el modelo que define la AOP fueron implementados en GAMS 23.8.1 y resueltos con CPLEX 12.4 como solver.

5.1.3. Análisis sobre la política óptima aproximada para una instancia pequeña

A continuación se analizarán las principales características de la política óptima aproximada obtenida de la metodología propuesta (que será referida simplemente como "la política" o AOP), para una instancia pequeña diseñada de forma arbitraria. Se analizarán las acciones sugeridas por la AOP en términos de los valores de Y_{hgp} (de derivación a clínicas) y Z_{hig} (de transferencia a otros hospitales), y luego cómo la política obtenida varía ante diferentes costos y niveles de congestión del sistema.

5.1.3.1. Análisis sobre la política óptima aproximada

A continuación se ilustran las principales propiedades y el desempeño de la AOP para un caso base. Para ello, se asume que la llegada de pacientes sigue una distribución de probabilidad discreta de media $\lambda_{hg}, \forall h, g$, y que la salida de pacientes sigue un proceso de Bernoulli con probabilidad de éxito (alta del paciente) $\rho_{hgl}, \forall h, g, l$.

El **caso base** considera $H \coloneqq 4$ hospitales públicos con 8, 10, 12 y 15 camas críticas en sus UCIs, respectivamente, y $P \coloneqq 1$ clínica privada con capacidad ilimitada. Se consideran $G \coloneqq 2$ grupos relacionados de diagnóstico, y que los pacientes que llevan

$L := 36$ días (tres veces el tiempo de estadía promedio más largo) o más se acumulan en la misma componente de estado. Las tasas de llegada de los pacientes a los hospitales se definen de tal manera que hay dos hospitales altamente congestionados ($h = 2$ y $h = 3$), uno con utilización esperada similar a su capacidad ($h = 1$), y el último ($h = 4$) menos congestionado. Las características de los parámetros de llegada y estadía se presentan en la Tabla 5.1. Los costos utilizados se basan en la realidad del sistema chileno, donde derivar y atender a un paciente a una clínica privada cuesta $k_{hgp} = 8\,400, \forall h, g, p$, más que atenderlo en el sistema público, mientras que el costo de utilizar una ambulancia para transferir a un paciente entre hospitales es $f_{hig} = 150, \forall h, i, g$ (con $h \neq i$). Como fue indicado anteriormente, se considera que $f_{hhg} = 0, \forall h, g$.

Tabla 5.1. Tasas de llegada, tiempos de estadía y utilización implícita usados en el caso base para el análisis de la AOP.

(a) Tasas de llegada de pacientes UCI, en pacientes/día (λ_{hg}).

		Grupo	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	0,50	0,30
	$h = 2$	0,70	0,40
	$h = 3$	0,85	0,55
	$h = 4$	0,80	0,65

(b) Largos de estadía promedio de pacientes UCI, en cantidad de días, asociados con ρ_{hgl}.

		Grupo	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	12,44	6,20
	$h = 2$	11,90	6,04
	$h = 3$	12,31	5,54
	$h = 4$	12,28	5,93
Promedio		12	6

(c) Utilización implícita (*implied utilization*) de pacientes UCI, como porcentaje[3].

		Util. Implícita
Hospital	$h = 1$	101,00 %
	$h = 2$	107,46 %
	$h = 3$	112,59 %
	$h = 4$	91,19 %
Global		102,26 %

Este caso fue resuelto en un computador con Windows 10 Pro de 64 bits, 6GB de RAM y procesador AMD A8-3510MX de 1.80 GHz, y tomó menos de 6 minutos en obtener la política óptima aproximada .

[3]Denotando μ_g como el largo de estadía promedio de un paciente del grupo g, λ_g como la tasa de llegada de pacientes del grupo g y K como la capacidad, por la Ley de Little se tiene que la utilización implícita (UI) es $UI = \frac{\sum_g \lambda_g \mu_g}{K}$. Notar que puede ser superior a 100 %, lo que indica la existencia de capacidad insuficiente, pues se están demandando más recursos de los que se tienen.

Interpretación de la política para el caso base

Los valores de los coeficientes Y_{hgp} y Z_{hig} obtenidos para el caso base son presentados en la Tabla 5.2. Lo primero a notar es que, por construcción, $Z_{hhg} = 0$, es decir, el valor del coeficiente asociado a aceptar a un paciente en el hospital al que llegó es igual a cero. Así, dado (5.15), la política sugiere que un paciente del grupo g que llegó al hospital h sea tratado en el hospital $\hat{\imath}$ o en la clínica $\hat{p}$ asociado con el menor valor entre $Z_{h\hat{\imath}g}$ e $Y_{hg\hat{p}}$, donde $\hat{\imath} \in \arg\min_i\{Z_{hig} : \text{hospital } i \text{ tiene camas disponibles}\}$ y $\hat{p} \in \arg\min_p\{Y_{hgp}\}$. Incluso cuando el hospital al que llega un paciente tiene camas disponibles, si el resultado indica otro hospital o clínica, la AOP sugiere que es preferible realizar dicha transferencia o derivación en vez de internarlo. Sin embargo, si el resultado de estos mínimos no es negativo, entonces la decisión por defecto es hospitalizar al paciente en el hospital público h al que llegó.

Tabla 5.2. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base (UCI).

(a) Valores del coeficiente Z_{hig} de transferencias a hospitales.

		Grupo $g=1$				Grupo $g=2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de llegada	$h=1$	0	150,00	347,82	150,00	0	209,26	–117,83	29,17
	$h=2$	150,00	0	347,82	150,00	90,74	0	–177,09	–30,09
	$h=3$	–47,82	–47,82	0	–47,82	417,83	477,09	0	297,00
	$h=4$	150,00	150,00	347,82	0	270,83	330,09	3,00	0

(b) Valores del coeficiente Y_{hg1} de derivaciones a clínicas.

		Grupo	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	315,00	3 738,52
	$h=2$	315,00	3 679,26
	$h=3$	117.18	4 006,35
	$h=4$	315,00	3 859,35

A modo de ejemplo, se puede analizar el caso destacado en gris claro de la Tabla 5.2, que refleja un proceder regular e intuitivo (e.g., es similar al proceder actual de los hospitales en Santiago, Chile). Si llega un paciente del grupo $g = 2$ al hospital $h = 3$, el administrador central debe intentar primero internarlo en dicho hospital (costo cero vs. costos positivos para todas las transferencias o derivaciones posibles). Sin embargo, si el hospital $h = 3$ no tiene ninguna cama disponible, debe intentar primero transferir el paciente al hospital $i = 4$, al ser el índice asociado al recinto con el segundo menor valor ($Z_{342} = 297{,}00$). Si ese hospital no tiene camas disponibles, entonces debe optar por el

hospital $i = 1$ ($Z_{312} = 417{,}83$). Si este último tampoco tuviera una cama disponible, debe recurrir al hospital $i = 2$ ($Z_{322} = 477{,}09$) y, si ese tampoco tiene, entonces el paciente se debería transferir a la clínica ($Y_{321} = 4\,006,35$). Notar que si hubiera más de una clínica privada, se enviaría a aquella de menor valor de coeficiente.

Por otro lado, el caso destacado en gris oscuro de la Tabla 5.2 ilustra un proceder novedoso **y proactivo**. La política a seguir por el administrador central si un paciente del grupo $g = 2$ llega al hospital $h = 2$ es, en primera instancia e independiente de si el hospital $h = 2$ tiene camas disponibles, intentar transferirlo al hospital $i = 3$ ($Z_{232} = -177{,}09 < 0 = Z_{222}$). Si ese hospital no tiene camas disponibles para internarlo, debe revisar el hospital $i = 4$ ($Z_{242} = -30{,}09$). Si no es posible admitirlo ahí, se debe intentar en el hospital $i = 2$ y, en el caso de que este tampoco tenga espacio, debe intentar admitirlo en el hospital $i = 1$ ($Z_{212} = 90{,}74$) antes de recurrir a la clínica ($Y_{221} = 3\,679{,}26$).

Esta AOP presenta numerosas propiedades que permiten gestionar de forma más eficiente la transferencia de pacientes entre hospitales públicos y la derivación a clínicas. Las siguientes observaciones son dignas de hacer notar:

- Dado que el costo de ambulancia f_{hig} fue considerado como el mismo para cualquier par de hospitales públicos $h \neq i$ y cualquier grupo g, si un tomador de decisiones centralizado solo considerara este costo entonces no tendría preferencia por ningún hospital público al cual transferir dicho paciente. Sin embargo, la AOP sugiere un orden de preferencia para realizar transferencias que va más allá del costo inmediato de la ambulancia, al considerar implícitamente la capacidad de cada hospital, las tasas de llegadas, y los tiempos promedio de estadía de cada grupo. Es decir, las decisiones dependen del nivel de ocupación promedio de cada hospital.
- Puede sonar contraintuitivo pagar un costo de traslado en ambulancia por transferir pacientes entre hospitales públicos cuando el hospital al que un paciente llega inicialmente tiene camas disponibles para hospitalizarlo (e.g., $h = 2, g = 2$ de

la Tabla 5.2). Sin embargo, esto cobra sentido cuando se considera que los tiempos de estadía de ciertos grupos (e.g., $g = 1$) pueden ser más largos, y que las tasas de llegada y el número de camas disponibles promedio pueden variar de un hospital a otro, debido a cierto nivel de especialización que puedan tener estos. Por ende, realizar transferencias proactivas puede evitar que el sistema transfiera más pacientes de forma reactiva en el futuro. El Anexo B.1 describe un ejemplo ilustrativo simple de esta propiedad.

- La Tabla 5.3 presenta los valores obtenidos para los coeficientes Y_{hgp} y Z_{hig} si $f_{hig} = 100, \forall h \neq i$, un valor menor. Este caso ayuda a ilustrar que la AOP puede dar sugerencias incluso más contraintuitivas. Por ejemplo, puede sugerir recurrir a clínicas privadas de forma proactiva (e.g., $h = 3, g = 1$ en la Tabla 5.3b, donde $Y_{311} = -27{,}07 < 0$), a pesar de que pareciera ser más caro que admitirlos en el hospital al que llegaron o transferirlos a otro público. Una vez más, dada la congestión de los hospitales, las diferentes tasas de llegada y tiempos de estadía más largos de algunos grupos, derivar a ciertos pacientes a la clínica puede resultar ser más eficiente que internarlos en un hospital altamente congestionado al que llegaron. La política reconoce esta situación al percibir en esta última decisión un potencial aumento en la cantidad esperada de derivaciones reactivas que se podrían necesitar en el futuro y, por ende, un costo esperado descontado mayor. El Anexo B.2 presenta un ejemplo simple de esta propiedad.

Tabla 5.3. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base (UCI) con $f_{hig} = 100, \forall h, i, g : h \neq i$.

(a) Valores del coeficiente Z_{hig} de transferencias entre hospitales, con $f_{hig} = 100, \forall h, i, g : h \neq i$.

		Grupo $g = 1$				Grupo $g = 2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
Hosp. de llegada	$h = 1$	0	100,00	393,07	100,00	0	159,62	–119,56	–21,56
	$h = 2$	100,00	0	393,07	100,00	40,38	0	–179,18	–81,18
	$h = 3$	–193,07	–193,07	0	–193,07	319,56	379,18	0	198,00
	$h = 4$	100,00	100,00	393,07	0	221,56	281,18	2,00	0

(b) Valores del coeficiente Y_{hg1} de derivaciones a clínicas, con $f_{hig} = 100, \forall h, i, g : h \neq i$.

		Grupo	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	266,00	3 710,70
	$h = 2$	266,00	3 650,65
	$h = 3$	–27,07	3 929,83
	$h = 4$	266,00	3 831,83

En particular, uno de los resultados más interesantes para el caso base (Tabla 5.2) es la forma en que la política sugiere internar solo a los pacientes con estadía promedio corta ($g = 2$) provenientes de tres de los cuatro hospitales ($h = 1, 2, 3$) en el hospital con la utilización implícita más alta ($h = 3$). Esto se debe a que la política busca transferir pacientes con estadía promedio larga a otros hospitales públicos proactivamente ($Z_{3i1} < 0, \forall i \neq 3$), y recibir a cambio pacientes con estadía promedio corta ($Z_{132}, Z_{232}, Z_{332} \leq 0$). El único hospital que no transfiere proactivamente pacientes con estadía promedio corta al hospital $h = 3$ es el hospital $h = 4$. Sin embargo, el hospital $i = 3$ es la primera opción de transferencia cuando el hospital $h = 4$ no tiene camas disponibles. ¿Por qué ocurre esto? Esto se explica porque el hospital $h = 3$, a pesar de su congestión, es el hospital que menor tiempo de estadía promedio tiene para los pacientes del grupo $g = 2$. De este modo, la política resultante aprovecha esa ventaja de algunos hospitales por sobre otros. Con el fin de tener camas disponibles suficientes para atender a este grupo de pacientes, la política transfiere los otros grupos de pacientes que ocupan más recursos (i.e., más días-cama) a los otros hospitales. Este descubrimiento es muy relevante, y podría considerarse como una invitación a especializar más algunos hospitales.Una especialización podría venir no sólo con una mejor provisión de cuidado (Eastaugh, 1992) sino que también con tiempos de estadía más cortos (Capkun et al., 2012).

Para ver que la política no solo sugiere un orden de preferencia para las transferencias/derivaciones (o incluso proactivas) cuando hay especialización en algunos hospitales, sino que también cuando todos los hospitales tienen el mismo tiempo de estadía promedio para cada grupo, se sugiere revisar los ejemplos entregados en el Anexo C.

Adicionalmente, se desarrolló un análisis en el que todos los parámetros del sistema se mantuvieron iguales que en el caso base, a excepción de la capacidad de los hospitales. Se consideró que todos los hospitales tuvieran 10 camas críticas. La política resultante sugiere transferencias proactivas (hospital $h = 3$ transfiriendo pacientes del grupo $g = 1$ a cualquier hospital y recibiendo pacientes del grupo $g = 2$ al hospital $h = 1$) y derivaciones (para el hospital $h = 3$ y grupo $g = 1$). Los resultados y detalle de este análisis se

presentan en el Anexo D.1, en el que es posible ver que, incluso cuando los hospitales tienen la misma capacidad, es conveniente realizar decisiones proactivas. Por supuesto, estos resultados serán distinto si las tasas de llegada y los tiempos de estadía promedio cambian.

Desempeño de la política para el caso base

En la Tabla 5.4 se comparan las tasas de ocupación de la red de hospitales públicos obtenidas luego de simular la AOP obtenida y una política miope. La política miope considera solamente el costo inmediato, ignorando cualquier impacto que las decisiones de hoy puedan tener en el desempeño futuro del sistema. En otras palabras, la política miope resuelve (5.15), pero usando $Y_{hgp} = k_{hgp}, \forall h, g, p$, y $Z_{hig} = f_{hig}, \forall h, i, g$, en lugar de los coeficientes de la AOP. Esta es, y como ya fue mencionado anteriormente, una buena manera de describir el proceder actual de la UGCC para el caso chileno, que es reactivo.

Sobre las variables aleatorias, McManus et al. (2004) mostraron que llegadas Poisson y tiempos de estadía exponenciales representan adecuadamente la realidad. Y, efectivamente, muchos estudios en la literatura han asumido las mismas distribuciones (Chao et al., 2003b; Koizumi et al., 2005; Shi et al., 2016). Este estudio utiliza las mismas distribuciones para la simulación de las políticas. Se simularon 100 réplicas de dos años con un período transiente de un año. La simulación fue implementada en Python 3.7.2 con Gurobi 8.1.0 como *solver*. Se usó un computador que tiene Windows 10 Home de 64 bits, 8GB de RAM, y un procesador Intel Core i7-8550U quad-core (1.80GHz). Los tiempos de simulación fueron de menos de 3 minutos para ambas políticas.

En las Tablas 5.4 y 5.5 se puede apreciar cómo la ocupación promedio disminuye al seguir la AOP, a pesar de que se atiende a más gente en el sector público y se deriva a menos pacientes al sector privado (los resultados son estadísticamente significativos). La AOP, al descongestionar el sistema transfiriendo y derivando pacientes de forma proactiva, permite hacer un uso más eficiente de las camas disponibles. Es importante notar que una tasa de ocupación muy baja puede ser entendida como un mal uso de los recursos.

Sin embargo, permite un mejor manejo de la demanda y provee un mayor margen para responder a situaciones extremas que puedan surgir. La AOP mantiene una tasa de ocupación que equilibra este *trade-off* de forma adecuada. Más aún, a pesar de que el número de derivaciones disminuye, también lo hace la ocupación global. Cabe notar también un ahorro promedio en el costo descontado estadísticamente significativo del 6,31 % (valor $p < 0{,}0001$).

Tabla 5.4. Comparación de la tasa de ocupación efectiva al simular el caso base para la política miope (MP) y la AOP.

	MP	AOP
Ocupación $h = 1$	92,02 %	93,37 %
Ocupación $h = 2$	91,29 %	92,25 %
Ocupación $h = 3$	91,47 %	77,74 %
Ocupación $h = 4$	89,95 %	93,94 %
Ocupación global	91,02 %	89,14 %

Tabla 5.5. Comparación entre la política miope versus la política óptima aproximada para el caso base con respecto a diversas medidas de desempeño. El margen de error es el correspondiente a un nivel de confianza de 95 %.

	MP	AOP	Δ %
Internados directo	1 119,8 ± 7,6	814,8 ± 4,7	–27,23 %
Transferencias	342,9 ± 5,2	663,9 ± 2,3	+93,61 %
Derivaciones	174,1 ± 7,2	159,6 ± 6,4	–8,32 %
Costo descontado	202 083 ± 15 214	189 336 ± 13 340	–6,31 %
Costo diario promedio	4 148 ± 167	3 945 ± 147	–4,89 %

Para determinar el desempeño de la AOP por sí sola, a su vez se programó el modelo de programación lineal que permite determinar las acciones óptimas si es que se supiera toda la información de los pacientes de antemano (ver Anexo F). Este modelo es conocido en la literatura como la relajación de información perfecta (Brown et al., 2010), o bien problema determinístico, y permite determinar el mejor desempeño que se podría lograr para un mismo conjunto de datos como si se conociera todo lo que fuera a ocurrir. Bajo los

mismos escenarios, se obtuvo[4] un costo descontado de 100 170 $\pm$ 8 101 (costo promedio diario de 1 765 $\pm$ 71), que representa un GAP de optimalidad de un 95,73 % $\pm$ 5,92 %. Comparando este costo con el obtenido al simular la política miope (ver Figura 5.1), es posible indicar que nos acercamos un 7,10 % $\pm$ 0,15 % a una situación ideal. Es importante mencionar que el valor obtenido en el escenario con información perfecta es inalcanzable, pues no es posible conocer con certeza el futuro. Así, es imposible que el GAP pueda ser 0 % (o bien se logre un ahorro de un 100 %).

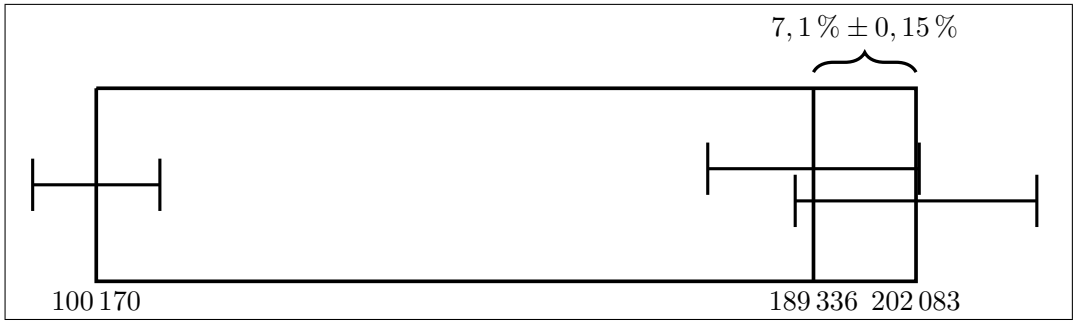


Figura 5.1. Ahorro efectivo logrado por la AOP para el caso base, con un nivel de confianza del 95 %.

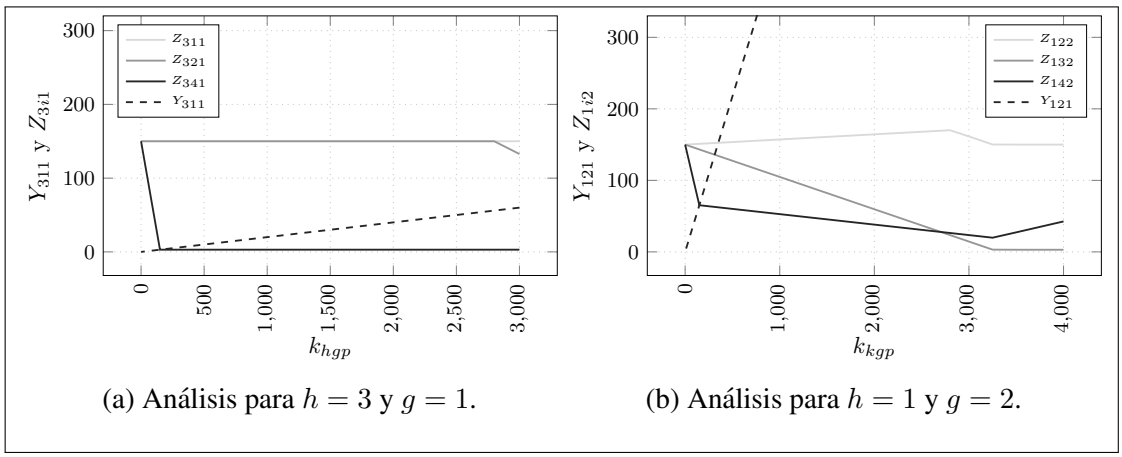
5.1.3.2. Análisis de sensibilidad sobre el modelo

Análisis de costos

Para entender mejor la AOP y su desempeño, en esta parte se analiza cómo las acciones de la AOP cambian ante variaciones de los costos transferencia y derivación (este último incluyendo el costo de atención). Para esto, se asume que los cambios afectan $k_{hgp}, \forall h, g, p$ o $f_{hig}, \forall h, i, g(h \neq i)$ de forma igual, manteniendo todos los otros parámetros constantes.

La Figura 5.2 presenta algunos valores de los coeficientes que definen la AOP para costos de derivación de pacientes al sector privado, k_{hgp}, menores al 8 400 utilizado en el caso base. De este modo, se puede ver qué políticas sugiere seguir el enfoque cuando un paciente llega a un hospital, ante diferentes escenarios de costo. En particular, se aprecia

[4]El modelo fue resuelto en Python 3.7.2 con Gurobi 8.1.0, en el mismo computador recientemente caracterizado. El tiempo de resolución para las 100 réplicas fue de 5,3 horas en total.



(a) Análisis para $h = 3$ y $g = 1$.

(b) Análisis para $h = 1$ y $g = 2$.

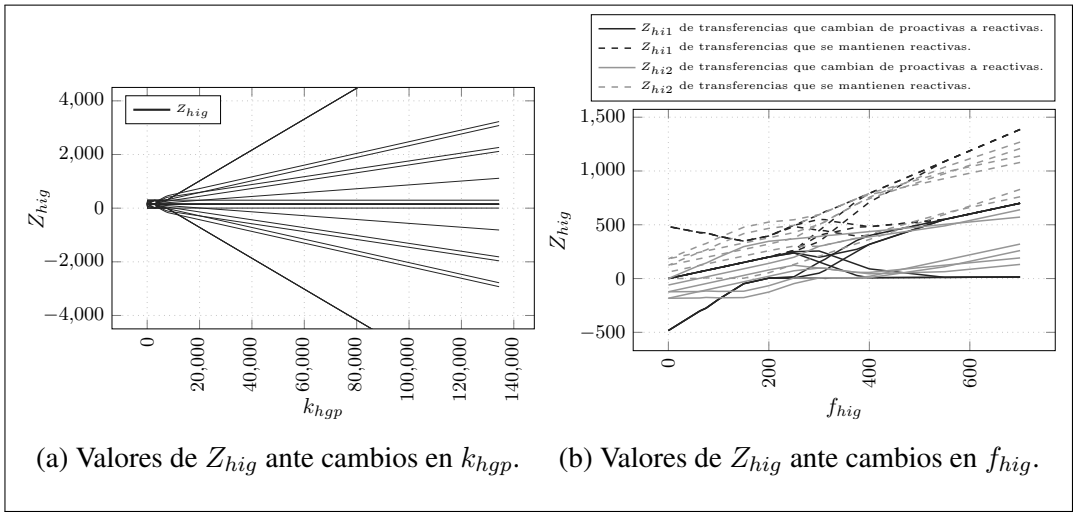
Figura 5.2. Variación del valor de algunos coeficientes Y_{hgp} y Z_{hig} ante cambios del costo de derivación y atención en clínicas privadas, k_{hgp}.

que no siempre se tiene que $Z_{hig} < Y_{hg1}$, lo que se traduce en que derivar pacientes al sistema privado no es siempre la última opción. Claramente, si el costo de derivación de pacientes al sistema privado es menor o igual a los costos de transferencia interhospitalaria ($k_{hgp} \in [0,\ 150]$), la política resultante sugerirá derivar pacientes directamente al sector privado. Sin embargo, incluso si dicho costo sobrepasa 150, los valores de los coeficientes asociados con las decisiones de derivación a privados (Y_{hgp}) se siguen manteniendo competitivos con algunos de los valores de los coeficientes asociados a las decisiones de transferencia entre hospitales públicos (Z_{hig}). Por ejemplo, en la Figura 5.2a, la línea discontinua, que representa Y_{311}, está por debajo de las líneas continuas que representan Z_{311} y Z_{321} para todo el tramo de k_{hgp} graficado. Se concluye que el enfoque puede resultar en AOPs en que es preferible derivar pacientes al sistema privado en lugar de mantenerlos dentro del sector público, a pesar de que el costo inmediato sea más alto.

La Figura 5.2b permite ilustrar que el orden de preferencia por las transferencias interhospitalarias en caso de ausencia de camas disponibles en el hospital al que el paciente llega, no se rige solamente por el costo de transferencia f_{hig}, si no que también por el costo de penalización de derivación reactiva a privados k_{hgp}. En este caso, para $k_{hgp} = 2\,000$, el orden de preferencia por hospitales para pacientes del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 1$ es $4 - 3 - 2$. Sin embargo, si $k_{hgp} = 3\,000$, el orden de preferencia cambia a

$3 - 4 - 2$, como se refleja al ver que las curvas Z_{132} y Z_{142} se cruzan antes de este valor. Esto se explica porque el efecto neto de las tasas de ocupación, tasas de entrada y tiempos de estadía promedio es tal que se vuelve más conveniente aprovechar la especialización del hospital $h = 3$ para derivar a menos pacientes en forma reactiva.

Al comparar ambas figuras, también es posible observar que a medida que el costo de derivación aumenta, derivar pacientes con diagnósticos asociados a estadías promedio más largas hacia privados se vuelve más conveniente que derivar pacientes con diagnósticos de estadías promedio más cortas, incluso cuando el sistema aún tiene camas libres. Esto se explica porque, comparativamente, la primera opción reduce de mayor manera la congestión del sistema. Esta acción disminuye la cantidad de derivaciones reactivas, disminuyendo las veces que se debe recurrir a enviar pacientes a clínicas y, en consecuencia, ahorrando gastos.



(a) Valores de Z_{hig} ante cambios en k_{hgp}. (b) Valores de Z_{hig} ante cambios en f_{hig}.

Figura 5.3. Variación del valor del coeficiente Z_{hig} como resultado de cambios en los costos de derivación $k_{hgp} \in [0, 140\,000]$ y los costos de transferencia interhospitalaria $f_{hig} \in [0, 700]$. Notar que $k_{hgp} = 8\,400$ y $f_{hig} = 150$ para el caso base.

La Figura 5.3 ilustra un segundo análisis de sensibilidad, que permite identificar cómo se comporta el valor del coeficiente Z_{hig} ante cambios en ambos costos, f_{hig} y k_{hgp}. Se

puede observar que la política de movimientos a obtener depende tanto del costo de transferencia interhospitalaria como del costo de derivación a clínicas, dado que en ambos análisis se aprecian valores que cambian de signo. En particular, los siguientes efectos son dignos de mencionar:

- Al aumentar los valores de derivación y atención de pacientes en el sector privado k_{hgp}, una vez que este factor supera un valor cercano a los 10 000, los coeficientes no hacen más que seguir una tendencia de aumento o descenso (ver Figura 5.3a). En el caso de valores Z_{hig} negativos, esta tendencia indica que las transferencias proactivas se vuelven aún más atractivas en términos de costo. Así, el costo marginal esperado (costo inmediato + costo futuro descontado) de transferir a un paciente a cualquier hospital público depende también del costo de derivarlo a una clínica privada.
- A medida que suben los costos de transferencia entre hospitales públicos f_{hig}, hay algunos coeficientes Z_{hig} que pasan de ser negativos a ser positivos, lo que implica que algunas transferencias sugeridas cambian de ser proactivas a reactivas. Esto se puede ver en la Figura 5.3b, en que la mayoría de los coeficientes de Z_{hig} cambian de signo a medida que aumenta el costo. Algunas interpretaciones que se pueden hacer son las siguientes:
  - Si el traslado de pacientes fuera gratuito sin alterar la configuración de tasas de llegada y de salida del caso base, todas las transferencias entre hospitales públicos que busquen aprovechar camas libres y especialización de hospitales (que dependen de dicha configuración) serían proactivas. La Tabla 5.6 muestra los valores de los coeficientes para este escenario en particular. Se puede apreciar una clara simetría en los valores de Z_{hig}. Además, de ser necesario, la AOP resultante también sugiere derivar pacientes a privados con el fin de descongestionar el sistema. Para este ejemplo, podemos notar que varios coeficientes Z_{hig} ($h \neq i$) tienen valor cero. Que el valor de esos coeficientes esté en cero significa que el sistema es indiferente al decidir si admitirlo al hospital

al que llegó o si transferirlo a otro hospital, a pesar de que haya un costo inmediato de transferencia positivo asociado a esto último. En particular, la AOP de este caso sugiere un orden de preferencia en particular para cada grupo de pacientes, independiente del hospital al que lleguen. Para el grupo $g = 1$, el ingreso es en cualquiera de los hospitales $i = 1, 2, 4$ o bien, si ninguno presenta camas disponibles, en la clínica, pero nunca en el hospital $i = 3$. Por el otro lado, el orden de intento para pacientes del grupo $g = 2$ es siempre primero en el hospital $h = 3$ o el $h = 4$ de forma indiferente, luego en el hospital $h = 1$, luego en el hospital $h = 2$ y, finalmente, en la clínica. Notar que esta AOP recomienda ubicar a los hospitales más especializados en cada grupo de pacientes primero, porque reconoce una ventaja en ello. Además, para aprovechar la especialización de los hospitales $h = 2$ y $h = 3$ en los grupos $g = 1$ y $g = 2$, respectivamente, el hospital $h = 2$ transfiere todos sus pacientes de estadía promedio corta ($g = 2$) a otros hospitales, mientras que el hospital $h = 3$ transfiere todos los de larga estadía promedio ($g = 1$) a otros recintos.

Tabla 5.6. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base con $f_{hig} = 0, \forall h, i, g$.

(a) Valores del coeficiente Z_{hig} de transferencias entre hospitales, con $f_{hig} = 0, \forall h, i, g$.

		Grupo $g = 1$				Grupo $g = 2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
Hosp. de llegada	$h = 1$	0	0	483,57	0	0	60,33	–123,03	–123,03
	$h = 2$	0	0	483,57	0	–60,33	0	–183,36	–183,36
	$h = 3$	–483,57	–483,57	0	–483,57	123,03	183,36	0	0
	$h = 4$	0	0	483,57	0	123,03	183,36	0	0

(b) Valores del coeficiente Y_{hg1} de derivaciones, con $f_{hig} = 0, \forall h, i, g$.

		Grupo	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	168,00	3 653,76
	$h = 2$	168,00	3 593,43
	$h = 3$	–315,57	3 776,79
	$h = 4$	168,00	3 776,79

- Si los costos de transferencia interhospitalaria son distintos de cero pero aún bajos ($f_{hig} \in (0, 50]$), la mayoría de estas transferencias proactivas seguirán siendo recomendadas (ver Figura 5.3b). Dado que transferir pacientes entre hospitales es muy barato, la política aún sugiere realizar estas transferencias

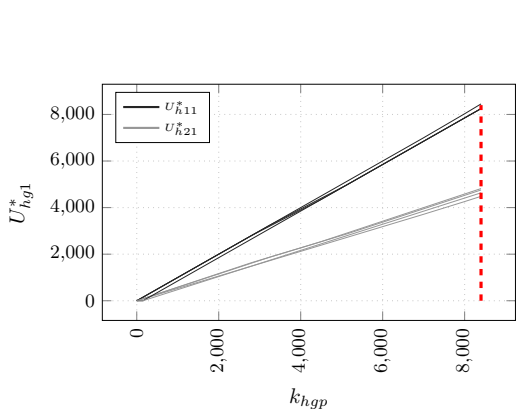
de formar proactiva para así aprovechar mejor el número de camas disponibles y el mayor nivel de especialización de algunos hospitales.

- Si comparamos, por ejemplo, el orden de preferencia para las transferencias/derivaciones de pacientes del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 2$ de la Tabla 5.2 ($3 - 4 - 2 - 1$−Privado) con el de costos interhospitalarios en cero de la Tabla 5.6 ($3 = 4 - 1 - 2$−Privado), podemos notar que la política resultante reordena los hospitales y elimina la indiferencia. Así, al igual que como ocurría al cambiar los costos de derivación a privados k_{hgp}, el orden de preferencia al transferir pacientes puede también cambiar en algunos casos. Esto ocurre porque la preferencia por hospitales con mayor cantidad de camas disponibles promedio y menores tiempos de estadía depende de la gravedad de la "penalización" en caso de que los pacientes tengan que ser transferidos/derivados reactivamente. Así, si el costo de transferencia aumenta, la cantidad de camas disponibles que se logra al realizar los movimientos proactivos indicados en la Tabla 5.6 no es suficiente para reducir los costos más que si se hubiera actuado de forma reactiva.

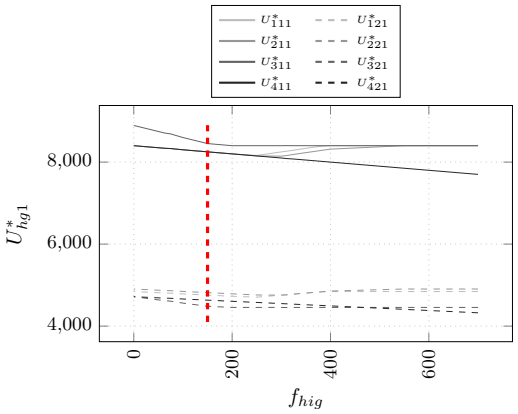
Vale la pena destacar que las decisiones de movimiento de pacientes sugeridas por la AOP dependen de las características del sistema estudiado, como el número de hospitales, sus capacidades, las tasas de llegada, los tiempos de estadía promedio y la especialización de estos.

Análisis sobre los costos marginales U^*_{hg1}

La Figura 5.4 ilustra cómo se comporta el costo marginal descontado esperado de recibir a un paciente para cada hospital, U^*_{hg1}, ante variaciones de los costos de transferencia hacia clínicas privadas y los costos de transferencia interhospitalaria. Para esto, se asume que los cambios afectan todos los costos respectivos, k_{hgp} y f_{hig}, de la misma manera, manteniendo todos los otros parámetros constantes. De este análisis es posible concluir que a medida que suben los costos de derivación a clínicas privadas, el costo marginal



(a) Valores de U^*_{hg1} ante cambios en k_{hgp}. En vertical y punteado está el valor utilizado para k_{hgp} en el caso base.



(b) Valores de U^*_{hg1} ante cambios en f_{hig}. En vertical y punteado está el valor utilizado para f_{hig} en el caso base.

Figura 5.4. Costo esperado descontado marginal de hospitalizar a un paciente, U^*_{hg1}, para los escenarios propuestos en la Figura 5.3.

descontado esperado de recibir a un paciente aumenta (y viceversa). Sin embargo, el costo asociado a pacientes con largos de estadía promedio más extensos ($g = 1$) aumenta de forma más pronunciada que aquel para pacientes con largos de estadía promedio más cortos ($g = 2$) (ver Figura 5.4a), dado los niveles de congestión asociados. Además, este análisis sugiere que a medida que sube el costo de transferencia interhospitalaria, el costo marginal descontado esperado de recibir a un paciente disminuye siempre para el hospital menos congestionado ($h = 4$), mientras que para el resto se mantiene constante luego de valores entre 200 y 450, aproximadamente. El hecho de que algunos valores se mantengan constantes mientras otros sigan descendiendo hace que las diferencias de los costos marginales se hagan mayores (ver Figura 5.4b). Esto afecta principalmente al coeficiente asociado con las decisiones de transferencias interhospitalarias, los que generan transferencias proactivas dependiendo del nivel de congestión de los distintos hospitales y su nivel de especialización. Por otro lado, el hecho de que algunos costos se mantengan iguales hace que los coeficientes Y_{hgp} no varíen. Esto último, junto con el hecho de que los coeficientes Z_{hig} sí varían, explica que la política sugiera comenzar a derivar pacientes a clínicas privadas por sobre realizar transferencias interhospitalarias en algunos casos. Por

último, también se aprecia una diferencia de los valores si se comparan GRDs. Por ejemplo, para el rango de valores de k_{hgp} estudiado, los valores para pacientes del grupo $g = 1$ varían sobre los 8 000, mientras que los del grupo $g = 2$ varían bajo valores de 5 000).

Análisis sobre la congestión del sistema

A continuación se describe cómo la AOP obtenida cambia ante variaciones en la congestión del sistema. Para este análisis se asume que el nivel de especialización de todos los hospitales para pacientes del grupo $g = 1$ es el mismo. Los valores de todos los otros parámetros se mantienen iguales a aquellos del caso base. Estos resultados capturan bien el impacto de cambios en la congestión general del sistema.

Tabla 5.7. Valores de algunos coeficientes Z_{hig} e Y_{hgp} ante variaciones en el largo de estadía promedio para los pacientes del grupo $g = 1$. La tercera fila muestra la utilización implícita global para cada tiempo de estadía promedio.

		Tiempo de estadía promedio para pacientes del grupo $g = 1$ ($\forall h$)							
		≤ 10	10,5	$\cdots$	11,4	11,45	11,5	$\cdots$	12
Util. Impl.		$\leq$ 88,17 %	91,34 %	$\cdots$	97,04 %	97,36 %	97,67 %	$\cdots$	100,84 %
Z_{hig}	Z_{121}	150,00	297,00		241,47	150,00	150,00		150,00
	Z_{131}	150,00	297,00		297,00	297,00	297,00		337,27
	Z_{141}	150,00	150,00		150,00	150,00	150,00		150,00
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
	Z_{311}	150,00	3,00		3,00	3,00	3,00		–37,27
	Z_{321}	150,00	150,00		94,47	3,00	3,00		–37,27
	Z_{341}	150,00	3,00		3,00	3,00	3,00		–37,27
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
	Z_{122}	150,00	244,54		150,00	77,43	57,26		49,51
	Z_{132}	150,00	238,13		3,00	–69,57	–153,81		–166,91
	Z_{142}	150,00	150,00		56,68	27,31	–6,81		–19,91
	Z_{212}	150,00	55,46		150,00	222,57	242,74		250,49
	Z_{232}	150,00	143,60		3,00	3,00	–61,06		–66,42
	Z_{242}	150,00	55,46		56,68	99,87	85,94		80,58
Y_{hgp}	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
	Y_{311}	8 400,00	8 253,00		3 983,56	2 620,99	1 030,91		127,72
	Y_{321}	8 400,00	8 311,87		5 915,45	5 159,84	4 282,14		3 925,78

La Tabla 5.7 muestra un extracto de los valores obtenidos para los coeficientes Z_{hig} e Y_{hgp} ante distintos niveles de congestión de sistema como resultado de considerar distintos largos de estadía para pacientes del grupo $g = 1$. En particular, es posible observar que:

- Si el tiempo de estadía promedio es menor o igual a 10 y, por lo tanto, el nivel de utilización global (i.e., la utilización implícita global) es menor o igual a 88,17 %, entonces $Z_{hig} = f_{hig} \geq 0$ y $Y_{hgp} = k_{hgp} > 0$. Esto se debe a que a estos niveles de congestión no existe costo futuro alguno, es decir, $U^*_{hg1} = 0$. Por lo tanto, no se sugiere realizar transferencias proactivas y la política resultante es la miope. Esto es explica porque si el nivel de congestión del sistema es tan bajo, entonces las transferencias de pacientes sólo generarían un costo descontado promedio más alto.
- Si el tiempo de estadía promedio para pacientes del grupo $g = 1$ aumenta a 10,5, la congestión del sistema aumenta a 91,34 % y algunos coeficientes Z_{hig} se acercan a 0, dependiendo del nivel de congestión del hospital de llegada y del grupo de pacientes que se trate. Nuevamente, un valor de coeficiente igual a cero implica que ingresar a un paciente en el hospital al que llega o transferirlo a otro hospital tiene las mismas consecuencias en el costo esperado, a pesar de que exista un costo de traslado positivo.
- A medida que la utilización implícita del sistema sigue aumentando producto del aumento en el tiempo de estadía promedio de los pacientes del grupo $g = 1$, algunos coeficientes Z_{hig} se hacen negativos, indicando la conveniencia de realizar transferencias proactivas. Específicamente, si el tiempo de estadía promedio es 11,45, conviene que el hospital $h = 1$ transfiera pacientes del grupo $g = 2$ al hacia el hospital $i = 3$ ($Z_{132} < 0$). Por el otro lado, resulta casi indiferente para el sistema internar o trasladar pacientes del grupo $g = 1$ que llegan al hospital $h = 3$ ($Z_{3i1} = 3, \forall i \neq 3$), aunque exista costo de traslado inmediato bastante mayor ($f_{3i1} = 150, \forall i \neq 3$). Lo anterior dado que este hospital se especializa en tratar pacientes del GRD $g = 2$.

- Si el tiempo de estadía de pacientes del grupo $g = 1$ aumenta aún más, la política resultante sugiere transferir pacientes de este grupo que llegan al hospital $h = 3$ a otro hospital (en lugar de admitirlo directamente donde llegó, pues $Z_{3i1} < 0, \forall i \neq 3$). Esto se debe a que el hospital $h = 3$ es uno de los más especializados en tratar a pacientes del grupo $g = 2$, al alto nivel de congestión del sistema, y a que los pacientes del grupo $g = 1$ están ocupando en promedio sus camas muchos más días en dicho hospital. De esa forma, es preferible liberar camas para pacientes del grupo $g = 2$.

Adicionalmente, se ha incluido un último análisis de ocupación en el Anexo D.2 para ver cómo se comporta la AOP cuando todos los hospitales son similares en términos de los tiempos de estadía promedio de los pacientes de un grupo específico, y cuáles son los cambios cuando solamente un hospital aumenta o disminuye su especialización para solamente un grupo de pacientes. Los resultados muestran que las características de la AOP no solamente dependen del nivel de especialización de la red de hospitales para un cierto grupo de pacientes sino que también del nivel de especialización que tienen el resto de los hospitales, las tasas de llegadas, y la cantidad de camas críticas.

Resumen de los descubrimientos del análisis de sensibilidad

A modo de resumen, se enlistan los principales descubrimientos asociados a esta instancia:

- No siempre derivar al privado es la última alternativa. Puede que el costo al privado haga derivar en políticas con derivaciones proactivas o que son preferibles ante algunas transferencias.
- El orden de preferencia de transferencia/derivación es dependiente del costo de derivación. Este orden hará que la política aproveche la especialización de algunos hospitales (derivar a pacientes con tiempos de estadía más largos es más conveniente que derivar a los de estadía más corta).

- Las transferencias serán proactivas dependiendo del costo de transferencia. A distintos costos, hay algunos sentidos de las transferencias en que se dejará de proponer como proactivas. Incluso, la AOP puede sugerir derivar pacientes ante distintos costos de transferencia, con el fin de descongestionar el sistema.
- Las tasas de entradas también influyen en las decisiones. A menores tasas de entradas, menos sentido tiene generar políticas proactivas. Las transferencias más ventajosas (aquellas que se asocian a aprovechar la especialización) serán las que serán proactivas (antes que el resto de las transferencias) en caso de ser necesario.

5.1.4. Sobre la gravedad de los pacientes

Por cómo funciona hoy en día la red de salud pública chilena, el fenómeno de transferencia de pacientes ya existe. Si un paciente es estabilizado en un establecimiento que no corresponde a su área de cobertura, este debe ser trasladado al hospital que le corresponde una vez estabilizado. Si no fuese posible hacerlo debido a que dicho hospital no posee capacidad para atenderlo, recién ahí se activa el protocolo de contactar a la UGCC para que le encuentre una cama en la red de salud pública. Este movimiento se gatilla a pesar de su calidad de crítico, dado que ya es transferible.

En el modelo descrito anteriormente, una unidad adicional de demanda es un paciente crítico ya estabilizado y que requiere una cama crítica. Por lo mismo, al ya estar estable, el paciente es considerado como transferible. Así, en términos prácticos, no se considera la gravedad del paciente dado que es historia previa (e.g., en la unidad de urgencias) al instante en que comienza a ser considerado como una unidad adicional de demanda de cama.

Sin embargo, si de todas formas se desea considerar en el modelo a los pacientes que no son transferibles, basta con considerar la generación de demanda un poco antes: cuando el paciente sale de urgencias (a pesar de no estar estable) y requiere de una cama crítica. En ese instante, se definirá si el paciente es transferible o no, y si requiere una cama en *algún* hospital de la red (en caso de poder ser transferible) o en el hospital *en el que ya*

está (en el caso en que no se puede trasladar). No está demás recordar el supuesto de que una vez que un paciente ocupa una cama crítica, se quedará ahí hasta que abandone el sistema.

Para adaptar el modelo, bastaría con trabajar con el doble de grupos de pacientes. Si originalmente se contaba con una cantidad G de grupos, al considerar la no-transferibilidad de algunos pacientes se tendrán $\widehat{G} = 2G$ grupos, dado que cada grupo original contará con dos tipos de pacientes: los transferibles y los no transferibles.

Para determinar las políticas generadas en este caso, se alteró el conjunto de datos utilizados en la Subsección 5.1.3 con el fin de considerar una porción de los pacientes como no transferibles. La Tabla 5.8 muestra las nuevas tasas de entrada utilizadas. Para este análisis, se consideró que los tiempos de estadía son los mismos, en promedio, independiente de si el paciente es o no transferible. La utilización implícita por hospital se mantuvo igual a la presentada en la Tabla 5.1.

Tabla 5.8. Tasas de llegada de pacientes UCI, usado para el análisis de gravedad del caso base, en pacientes/día (λ_{hg}).

		Grupo					
		$g = 1$ original			$g = 2$ original		
		Tras.	No tras.	Total	Tras.	No tras.	Total
Hospital	$h = 1$	0,43	0,07	0,50	0,26	0,04	0,30
	$h = 2$	0,60	0,10	0,70	0,34	0,06	0,40
	$h = 3$	0,72	0,13	0,85	0,47	0,08	0,55
	$h = 4$	0,68	0,12	0,80	0,55	0,10	0,65

Cabe mencionar que la modelación se mantiene igual. Basta con que el conjunto $\mathcal{M}$ de la restricción (5.3) sea tal que incluya al trío de índices (h, i, g) si g es un *subgrupo* de pacientes intransferible y $h \neq i$. Es decir, que se impida la transferencia interhospitalaria de pacientes graves (o, en otras palabras, que sea considerado como intransferible). Para evitar infactibilidad, se asume que los pacientes siempre pueden ser derivados al privado si es necesario (o derivar otro paciente para hacer espacio).

Tras resolver el modelo para obtener la AOP con este nuevo conjunto de grupos y de datos, se obtuvieron los coeficientes presentados en la Tabla 5.9. No se incluyen los coeficientes Z_{hig} para grupos intransferibles dado que todos (salvo la diagonal de admisión directa, que tienen el valor de 0) son prohibidos. Por otro lado, tampoco se incluyen los coeficientes Y_{hg1} asociados a pacientes no transferibles, dado que resultaron todos estrictamente positivos, indicando que siempre se intentará internar al paciente en el hospital al que llegó antes de derivarlo al privado.

Tabla 5.9. Valores de los coeficientes de pacientes transferibles obtenidos para el caso base (sólo UCI) considerando una porción de los grupos como intransferible.

(a) Valores del coeficiente Z_{hig} de transferencias entre hospitales.

		Grupo $g=1$, pac. transferible				Grupo $g=2$, pac. transferible			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de llegada	$h=1$	0,00	150,00	297,00	150,00	0,00	209,26	–144,89	29,17
	$h=2$	150,00	0,00	297,00	150,00	90,74	0,00	–204,05	–30,09
	$h=3$	3,00	3,00	0,00	3,00	444,79	504,05	0,00	323,96
	$h=4$	150,00	150,00	297,00	0,00	270,83	330,09	–23,95	0,00

(b) Valores del coeficiente Y_{hg1} de derivaciones a clínicas.

		Grupos transferibles	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	315,00	3 738,51
	$h=2$	315,00	3 679,26
	$h=3$	168,00	4 033,31
	$h=4$	315,00	3 859,35

Al compararlos con la Tabla 5.2 del caso base original, se puede apreciar un reajuste en la política, dado que ahora hay una porción de los pacientes que no podrán aprovechar la eficiencia resolutiva o el nivel de ocupación promedio de hospitales distintos al que llegaron. Un aspecto significante es que, ahora, los pacientes del grupo $g = 1$ sí podrán pasar por el hospital $i = 3$ antes de decidir derivarlos al privado. Esto es distinto a lo que ocurría en el caso base, en donde se prefería enviar a privado antes que sean atendidos en el hospital $i = 3$. Sin embargo, esta acción se considera en un orden de preferencia que lo deja como última opción entre los hospitales públicos. Otro cambio que se da, en cierta forma para compensar lo anterior, es que la política ahora indica que todos los pacientes del grupo $g = 2$ (estadía corta) que lleguen al sistema (independiente de a qué hospital lleguen), deberían ser atendidos en el hospital $i = 3$ de ser posible. Esto debido principalmente a su alto nivel de especialización en pacientes con este diagnóstico. Es

posible notar que ocurre lo mismo con los del hospital $h = 4$ (distinto a como ocurría en el caso base). Es decir, se está haciendo un mejor uso de su diferencia en la eficiencia resolutiva.

Tabla 5.10. Comparación de promedios entre la AOP obtenida para el caso base versus la AOP obtenida considerando una porción de pacientes intransferibles con respecto a diversas medidas de desempeño.

	AOP con sólo trasladables	AOP con no trasladables	Δ %
Internados directo	814,8	935,5	+14,81 %
Transferencias	663,9	536,7	–19,16 %
Derivaciones	159,6	163,3	+2,31 %
Costo descontado	189 336	195 320	+3,16 %
Costo diario promedio	3 945	3 978	+0,84 %

Además, luego de simular el desempeño, se obtiene un costo descontado 3,16 % mayor, como se aprecia en la Tabla 5.10. Esto cobra sentido si se piensa que se está tratando con un modelo que es más restringido que el anterior, al haber algunas transferencias no permitidas, lo que obliga a que hayan más transferencias y derivaciones reactivas.

5.2. Transferencias interhospitalarias de pacientes que requieren UCI a nivel regional

La Red de Salud chilena se divide, desde 1979, en 29 servicios de salud (SSs) responsables de efectuar sus prestaciones en áreas geográficos determinados. Las sedes y los territorios de cada uno de los servicios "están establecidos por decreto del [Ministerio de Salud], por orden del Presidente" (Ortega, 2018, p.27), y en algunas regiones de Chile existe más de un SS. En particular, en la Región Metropolitana existen 6 SSs: el Servicio de Salud Metropolitano Central (SSMC), Norte (SSMN), Oriente (SSMO), Occidente (SSMOC), Sur (SSMS) y Sur Oriente (SSMSO). La Figura 5.5 ilustra los seis SSs correspondientes a la Región Metropolitana, mostrando los 17 hospitales que tienen camas UCI adulto.

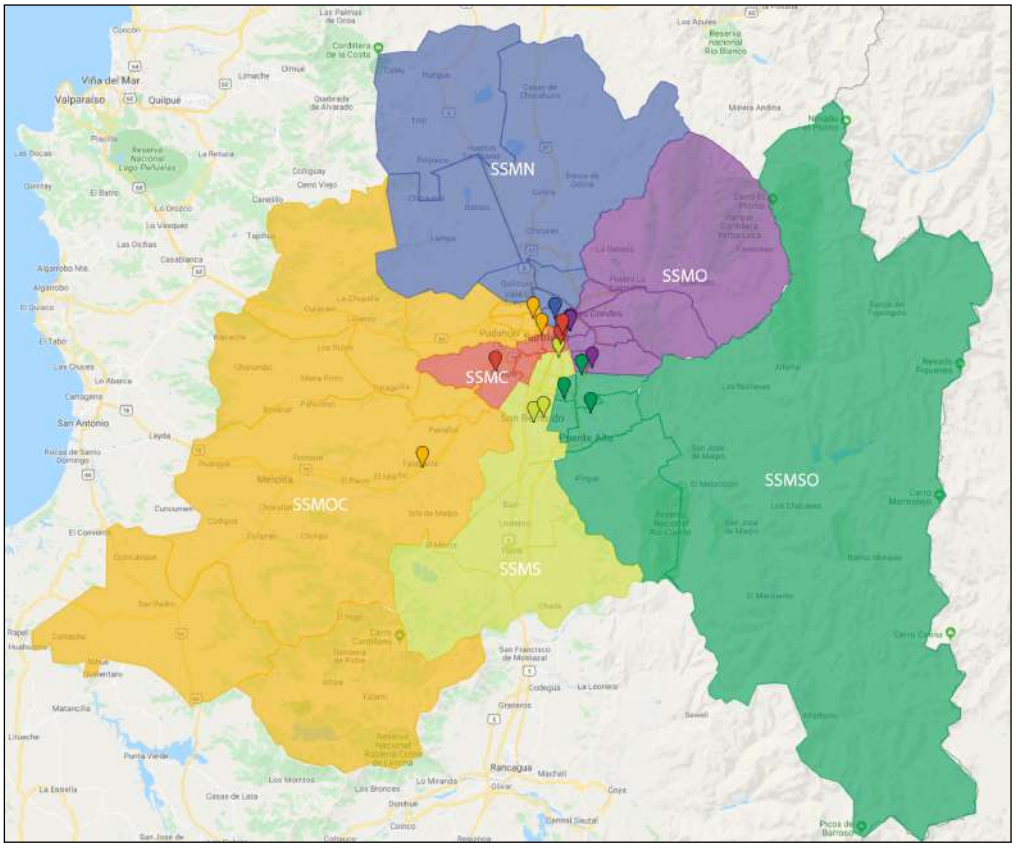


Figura 5.5. Servicios de Salud de la Región Metropolitana.
Fuente: Elaboración propia.

Hoy en día, se intenta que las prestaciones de estos servicios se mantenga de forma interna antes de recurrir a otros servicios de salud. Es decir, si un paciente no encuentra una cama disponible en un hospital del SSMS, se intenta que este paciente sea atendido en alguno de los otros hospitales del SSMS antes de intentar transferirlo a algún hospital público de otro SS.

En esta sección, se describe cómo se puede utilizar la metodología propuesta en esta tesis doctoral para determinar si conviene mantener un procedimiento reactivo y, por ende, si es mejor operar como Red Metropolitana en vez de 6 servicios semi-independientes. En particular, esta sección busca responder las siguientes preguntas: ¿Se puede aplicar la metodología propuesta para determinar si es conveniente realizar movimientos proactivos entre servicios de salud? Más adelante, en Subsección 6.1.3, se contestarán además las

siguientes preguntas: ¿Es beneficioso para la red metropolitana, en términos monetarios, que las decisiones sean tomadas de forma centralizada para todos los SSs? ¿Cómo aumenta el tiempo de ejecución/resolución del enfoque propuesto a medida que el tamaño del espacio de estados aumenta dado un aumento en la cantidad de hospitales a considerar?

Formulación instanciada

Este problema sigue correspondiendo a un proceso de toma de decisiones secuencial, cuya estructura sigue siendo la misma que la presentada en el Capítulo 4. Así, se puede utilizar el mismo enfoque de solución para determinar políticas proactivas de transferencia interhospitalarias.

Sin embargo, hay que considerar un cambio de interpretación en el número H, hasta ahora la cantidad de hospitales. Si H se interpreta como el número de sectores a considerar, el modelo presentado en la Sección 6.1 se puede reutilizar. Por ejemplo, $H = 3$ si se desea considerar solamente tres sectores, $H = 6$ si se consideran seis sectores (e.g., los seis SSs correspondientes a la Región Metropolitana), o $H = 17$ si se considera que esa es la cantidad de hospitales públicos que hay entre los seis SSs de la Región Metropolitana con al menos una cama crítica UCI adulto.

Así, la formulación queda completamente igual, por lo que el problema a resolver se reduce a obtener los valores $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$ en (5.9) para poder definir los coeficientes Y_{hgp} y Z_{hig} que definen la AOP en (5.15).

La respuesta a la pregunta de si conviene o no realizar movimientos proactivos entre SSs será resuelta en el Capítulo 6, junto al resto de las aplicaciones basadas en el mundo real.

5.3. Transferencias interhospitalarias de pacientes que requieren UCI o UTI por sector

En esta sección se mostrará cómo se adaptó el enfoque de solución para resolver el segundo problema ilustrado en el Capítulo 3: transferencia interhospitalaria de pacientes que tienen requerimientos de camas UCI o UTI.

Como en esta sección se consideran pacientes con distinto nivel de complejidad, para que un grupo de hospitales pueda aplicar el método propuesto de forma correcta es necesario que se determine, además de su diagnóstico, si el nivel de cuidado requerido por el paciente es para UTI o para UCI. Para ello, Nasraway et al. (1998) propone directrices sobre cómo reconocer a un paciente que requiere atención en una UTI. En particular, los pacientes UTI son pacientes de menor complejidad resolutiva y, por lo tanto, requieren de camas de menor complejidad técnica. Esto quiere decir que las camas de UTI pueden contar con menor equipamiento médico. Por ejemplo, no requieren de respirador artificial, equipamiento que una cama UCI sí debe tener.

En rigor, un paciente UTI puede ser atendido en una cama UCI dado que, en el peor de los casos, no se estará sacando provecho a todo el equipamiento disponible, pero esto no estará perjudicando a su salud. Distinto es para el caso contrario: un paciente de UCI no puede ser atendido en una cama UTI, dado que es una cama de menor complejidad que la que necesita.

Así, esta sección ilustra el camino utilizado para poder responder a las siguientes preguntas: ¿Permite la metodología propuesta en el Capítulo 4 considera diversos tipos de complejidad de pacientes y camas críticas? ¿Se siguen generando movimientos de pacientes UCI entre hospitales públicos? ¿La proactividad de movimientos de pacientes UTI en la red genera beneficios económicos? ¿Genera beneficios el generar políticas que indiquen que algunos grupos de pacientes UTI ocupen camas UCI de forma proactiva? ¿Es posible que la política indique a qué tipo de pacientes y de qué complejidad es conveniente transferir o derivar, a qué hospital y a qué tipo de cama?

5.3.1. Formulación instanciada

Esta subsección muestra la formulación para responder a la primera pregunta de las recién planteadas. Para ello, se describirá cada una de las componentes de la formulación MDP que permite generar las políticas.

Se considera nuevamente un sistema con H hospitales públicos (en adelante, simplemente "hospitales") que proveen servicio a pacientes clasificados en G grupos relacionados de diagnóstico (GRDs), cada uno con tasas de llegada y largos de estadía potencialmente distintos. Cada grupo, a su vez, se divide en una lista de C niveles de complejidad (en adelante, simplemente "complejidades") distintos. El hospital h tiene una cantidad K_{hc} de camas críticas de nivel de complejidad c, que define la capacidad de cada hospital para admitir pacientes de dicha complejidad. Al igual que para el problema anterior, se considerará un conjunto de P recintos privados (en adelante, simplemente "clínicas") que pueden recibir una cantidad ilimitada de pacientes de cualquier grupo y complejidad. Nuevamente, se asume que todo paciente que necesita atención en una cama crítica debe ser atendido en algún recinto, ya sea público o privado.

El modelo se construye sobre los mismos supuestos que para los problemas anteriores: los pacientes ocupan capacidad hospitalaria recién cuando son hospitalizados en alguna cama crítica y no antes; un paciente, una vez internado, se quedará en la misma cama hasta que es dado alta; y no existen tiempos de setup de camas recién desocupadas ni tiempos de transferencias, pues estas ocurren dentro del período de toma de decisiones. A su vez, una unidad de demanda de cualquier complejidad surge cuando un paciente crítico que es trasferible requiere de una cama compatible.

5.3.1.1. Épocas de decisión

Las épocas de decisión son las mismas a las descritas 5.1.1.1 (página 32).

5.3.1.2. Espacio de estados

Un estado $\mathbf{s} \in S$ contendrá la misma información que para el primer problema, solamente que ahora incorporará información sobre la complejidad de los pacientes. Por lo tanto, un estado queda definido como:

$$\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) = \Big(u_{11111}, \ldots, u_{HGCCL}; d_{111}, \ldots, d_{HGC}\Big),$$

en que $u_{hgcjl} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde a la cantidad de pacientes en el hospital h con un nivel de complejidad c del GRD de código g (que llamaremos grupo g) que han completado l días de estadía ocupando una cama de tipo j, y $d_{hgc} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde a la cantidad de pacientes del grupo g que llegaron al hospital h durante el último día y que requieren atención crítica de un nivel de complejidad c en algún recinto. Los estados con $l = L$ también son definidos como la cantidad de pacientes que llevan L o más días de estadía.

Al igual que para el primer problema, la componente u_{hgcjl} está limitada superiormente por el número de camas K_{hj} del tipo j disponibles en el hospital h. A su vez, la componente d_{hgc} se asume acotada por un número mucho menor que la población a la que la red de hospitales sirve. De este modo, S incluye un conjunto finito de estados.

Dada la naturaleza del problema, no todos los estados potenciales son factibles. Como los hospitales poseen un número limitado de camas críticas, las componentes u_{hgcjl} de los estados deben satisfacer las siguientes condiciones:

$$\sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \sum_{l=1}^{L} u_{hgcjl} \leq K_{hj} \qquad \forall h, j. \tag{5.16}$$

$$u_{hgcjl} = 0 \qquad \forall h, g, c, j, l : \text{comp}(j) < \text{comp}(c), \tag{5.17}$$

en que comp($\bullet$) corresponde al nivel de complejidad del paciente o de la cama.

5.3.1.3. Conjunto de acciones

Al inicio de cada día, el administrador debe tomar las mismas decisiones que para el primer problema, solamente que ahora considerando las complejidades de los pacientes. Así, cada acción disponible estará dada por un vector

$$\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z}) = (y_{1111}, \ldots, y_{HGCP}; z_{11111}, \ldots, z_{HGCHC}),$$

en que $y_{hgcp} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde al número de pacientes del grupo g con un nivel de complejidad c que fueron trasladados desde el hospital público h a la clínica privada p, $z_{hgcij} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde al número de pacientes del grupo g con un nivel de complejidad c trasladados desde el hospital público h a una cama de tipo j desde el hospital público i (con $i \neq h$), y $z_{hgchj} \in \mathbb{Z}_0^+$ corresponde al número de pacientes del grupo g con un nivel de complejidad c que fueron internados en un tipo de cama j en el hospital público h al que llegaron en primera instancia.

Es importante notar que las componentes de cada acción están regidas por restricciones similares a las del primer problema de esta tesis, con las modificaciones pertinentes. Así, el conjunto de acciones factibles para un estado $(\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S$, denotado como $A_{(\mathbf{u},\mathbf{d})}$, debe satisfacer que todos los pacientes que llegan a un hospital deben ser ingresados o trasladados a otro recinto, ya sea público o privado, como se muestra a continuación:

$$d_{hgc} = \sum_{i=1}^{H} \sum_{j \in C} z_{hgcij} + \sum_{p=1}^{P} y_{hgcp} \qquad \forall h, g, c. \tag{5.18}$$

También se debe dar que la cantidad de pacientes a internar y las transferencias de pacientes asociadas a cada hospital no supere la capacidad de cada hospital. Para ello, para cada hospital y tipo de complejidad, la cantidad de pacientes internados previamente y que no han dejado el sistema, más los que llegaron en el último período y son internados, y aquellos que fueron recibidos e internados el último período viniendo desde otros hospitales, menos los que fueron transferidos a otros hospitales y los derivados al sector privado, debe

ser menor o igual que la capacidad de cada hospital:

$$\sum_{g=1}^{G}\Bigg[\overbrace{\Bigg(d_{hgj}+\sum_{\substack{c\in C\\ c\neq j}} z_{hgchj}+\sum_{\substack{i=1\\ i\neq h}}^{H}\sum_{c\in C} z_{igchj}-\sum_{\substack{c\in C\\ c\neq j}} z_{hgjhc}-\sum_{\substack{i=1\\ i\neq h}}^{H}\sum_{c\in C} z_{hgjic}-\sum_{p=1}^{P} y_{hgjp}\Bigg)}^{\text{Cantidad de pacientes del grupo } g \text{ que se decide internar en una cama de tipo } j \text{ del hospital } h} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{c\in C} u_{hgcjl}\Bigg] \leq K_{hj} \qquad \forall h, j. \tag{5.19}$$

Por último, y más relevantemente que para el primer problema, además de admisiones y/o transferencias no permitidas por razones físicas o de distancia, ahora se debe considerar también que las asignaciones de cama respeten la complejidad de los pacientes. En particular, por ejemplo, un paciente de alta complejidad no puede ser atendido en una cama crítica destinada a pacientes de menor complejidad. Todas estas acciones no factibles están reflejadas en la siguiente restricción

$$z_{hgcij} = 0 \qquad \forall (h, g, c, i, j) \in \mathcal{M} \tag{5.20}$$

en que $\mathcal{M}$ es el conjunto de quintetos de índices que tienen asociado un ingreso o transferencia no permitida. Notemos, en particular, que $(h, g, c, i, j) \in \mathcal{M}$ si $\text{comp}(j) < \text{comp}(c)$.

5.3.1.4. Probabilidades de transición

La incertidumbre en las transiciones queda regida por las mismas variables aleatorias que para el primer problema, sin embargo, modificándolas para que ahora consideren la complejidad de los pacientes. La primera, q_{hgc}, representa la cantidad de pacientes del grupo g que llegan directo al hospital h durante un día requiriendo una atención con un nivel de complejidad c. La segunda, r_{hgcjl}, corresponde a la cantidad de pacientes del grupo g con un nivel de complejidad c y largo de estadía l en una cama de tipo j que dejan el hospital h de forma diaria. Al igual que antes, esta última variable aleatoria se define así para que las tasas con las que grupos diferentes de pacientes son dados de alta puedan

depender de la cantidad de días que los pacientes llevan internados, como generalmente ocurre.

De esta forma, las probabilidades de transición que determinan el estado del sistema en el siguiente período, denotado por $\mathbf{s}' = (\mathbf{u}', \mathbf{d}')$, están dadas por:

$$p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a}) = \begin{cases} \prod_{h=1}^{H} \prod_{g=1}^{G} \prod_{c \in C} \prod_{j \in C} \prod_{l=1}^{L} \mathbb{P}(q_{hgc}) \mathbb{P}(r_{hgcjl}|\mathbf{s}, \mathbf{a}), & \text{si } \mathbf{s}' \text{ satisface (5.21)-(5.25);} \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

$$u'_{h,g,j,j,1} = d_{hgj} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{H} z_{igjhj} - \sum_{\substack{c \in C \\ c \neq j}} z_{hgjhc} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{H} \sum_{c \in C} z_{hgjic} - \sum_{p=1}^{P} y_{hgjp} - r_{h,g,j,j,0} \qquad \forall h, g, j. \tag{5.21}$$

$$u'_{h,g,c,j,1} = \sum_{i=1}^{H} z_{igchj} - r_{h,g,c,j,0} \qquad \forall h, g, c, j : c \neq j. \tag{5.22}$$

$$u'_{h,g,c,j,l} = u_{h,g,c,j,l-1} - r_{h,g,c,j,l-1} \qquad \forall h, g, c, j, l : 2 \leq l \leq L-1. \tag{5.23}$$

$$u'_{h,g,c,j,L} = u_{h,g,c,j,L-1} - r_{h,g,c,j,L-1} + u_{h,g,c,j,L} - r_{h,g,c,j,L} \qquad \forall h, g, c, j. \tag{5.24}$$

$$d'_{hgc} = q_{hgc} \qquad \forall h, g, c. \tag{5.25}$$

Al igual que antes, las ecuaciones (5.21)-(5.24) determinan el número de pacientes en cada hospital por largo de estadía, mientras que las ecuaciones (5.25) definen la cantidad de pacientes que llegaron a cada hospital durante el último período y que hay que distribuir entre los diferentes recintos hospitalarios.

5.3.1.5. Costos inmediatos

En este caso, los costos que conlleva tomar una acción $\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z}) \in A_{(\mathbf{u},\mathbf{d})}$ en el estado $\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S$ tienen los mismos componentes. Sin embargo, hay que considerar las complejidades, como se muestra en la siguiente expresión:

$$c(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \sum_{p=1}^{P} k_{hgcp} y_{hgcp} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \sum_{i=1}^{H} \sum_{j \in C} f_{higc} z_{hgcij} \quad \forall (\mathbf{s}, \mathbf{a}) : \mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}, \mathbf{s} \in S,$$

donde f_{higc} es el costo de transferir y atender a un paciente del grupo g con nivel de complejidad c desde el hospital público h al hospital público i, y k_{hgcp} es el costo de transferir y atender a un paciente del grupo g que requería un nivel de complejidad c desde el hospital público h a una clínica privada p. Acá, se está considerando que el costo depende de la complejidad original del paciente y no de la complejidad de la cama en la que finalmente se atiende.

Sin embargo, notemos que es posible asumir que el costo de atender a un paciente de cierta categoría es el mismo por grupo, y que todos los pacientes deben ser atendidos. Con este supuesto, el menor de todos los costos de atención se vuelve constante y es posible re-escalar cada costo de la siguiente manera (para ilustrar de forma más sencilla los resultados). Sea $\hat{c}$ la complejidad que tiene el menor costo de todos. Así, $f_{higc}, \forall c \neq \hat{c}$ puede considerarse como qué tanto más caro es (transferir y) atender a un paciente de la complejidad c que los de la complejidad $\hat{c}$, y $f_{hig\hat{c}}$ como solamente el costo de transferencia interhospitalaria[5]. Esto implica que $f_{hhg\hat{c}} = 0, \forall h, g$. Bajo estos supuestos, el costo de derivar un paciente a una clínica privada k_{hgcp} puede ser considerado como el costo adicional de atender a un paciente de cualquier complejidad vs. atender a un paciente de la menor complejidad[6].

5.3.1.6. Ecuaciones de optimalidad

Dado que se siguen buscando políticas estacionarias, la función de valor de este MDP también define el mínimo costo total esperado, descontado en un horizonte de tiempo infinito. Este valor, que está denotado por $v(\mathbf{s})$ para el estado $\mathbf{s}$, permitirá identificar la

[5]De no ser así, basta con sumar a cada componente f_{higc} el costo completo de la resolución del nivel de complejidad c grupo g del hospital i.

[6]A continuación un ejemplo sencillo. Supongamos dos niveles de complejidad: UCI y UTI, de alta y no tan alta complejidad, respectivamente. Si internar y atender a un pacientes UTI cuestan 100, internar y atender a un paciente UCI cuesta 300, derivar a uno UTI cuesta 1000 y derivar a uno UCI cuesta 2000; entonces los costos pueden re-escalarse haciendo que internar y atender a uno UTI cueste 0, internar y atender a uno UCI cueste 200, derivar a uno UTI cueste 900 y derivar a uno UCI cueste 1900.

política óptima estacionaria al resolver las ecuaciones de Bellman:

$$v(\mathbf{s}) = \min_{\mathbf{a} \in A_{\mathbf{s}}} \left\{ c(\mathbf{s}, \mathbf{a}) + \gamma \sum_{\mathbf{s}' \in S} p(\mathbf{s}'|\mathbf{s}, \mathbf{a}) v(\mathbf{s}') \right\} \qquad \forall \mathbf{s} \in S, \tag{5.26}$$

donde γ es el factor de descuento diario.

Nuevamente, la cantidad de estados y acciones a ser considerados para resolver el sistema de ecuaciones (5.26) es tal que es imposible utilizar métodos tradicionales de programación dinámica con este fin. Por un lado, la variable de estado $\mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d})$ tiene $HGC^2L + HGC$ dimensiones, mientras que la variable de acción $\mathbf{a} = (\mathbf{y}, \mathbf{z})$ tiene $(HGP + H^2G)$ dimensiones. La cantidad de dimensiones es mayor que las presentadas en el primer problema, por lo que la cantidad de estados y acciones posibles es incluso mayor, haciéndolo imposible de resolver de forma directa para problemas de tamaño real.

5.3.2. Lidiando con la maldición de la dimensionalidad

Al plantear (4.3) para este problema, se obtiene un modelo que tiene incluso más variables que el planteado para el primer problema, arrastrando el problema de la dimensionalidad. Para solucionarlo, se usará nuevamente una aproximación afín propuesta, con la estructura propuesta en el Capítulo 4, para representar $v(\mathbf{u}, \mathbf{d})$ en las variables de estado de esta formulación:

$$v(\mathbf{u}, \mathbf{d}) = \beta + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \sum_{j \in C} \sum_{l=1}^{L} U_{hgcjl} u_{hgcjl} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} D_{hgc} d_{hgc}, \quad \forall \mathbf{s} = (\mathbf{u}, \mathbf{d}) \in S \tag{5.27}$$

$$\mathbf{U}, \mathbf{D} \geq 0, \beta \in \mathbb{R}$$

Al igual que para la Sección 5.1, los parámetros que definen (5.27) también tienen una interpretación clara. U_{hgcjl} representa el costo marginal esperado descontado asociado a tener una cama adicional del tipo j ocupada por un paciente con un nivel de complejidad c del grupo g que pasará su l-ésima noche de estadía en el hospital h. Por otra parte, D_{hgc}

representa el costo marginal esperado descontado asociado con tener a un paciente adicional del grupo g que requiere una atención de un nivel de complejidad c y está esperando en el hospital h a ser ingresado, transferido o derivado.

Así, es posible reemplazar la función de valor en (4.3) por la aproximación (5.27) y formular el siguiente problema de programación lineal equivalente aproximado (ALP_{UTI}).

$$ALP_{UTI}) \quad \max_{\mathbf{U},\mathbf{D},\beta} \quad \beta + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C}\sum_{j\in C}\sum_{l=1}^{L}\mathbb{E}_\alpha[u_{hgcjl}]U_{hgcjl} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C}\mathbb{E}_\alpha[d_{hgc}]D_{hgc} \tag{5.28}$$

$$\begin{aligned} \text{s.a} \quad & (1-\gamma)\beta + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C}\sum_{j\in C}\sum_{l=1}^{L}\mu_{hgcl}(\mathbf{s},\mathbf{a})U_{hgcjl} \\ & \qquad + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C}\delta_{hgc}(\mathbf{s},\mathbf{a})D_{hgc} \leq c(\mathbf{s},\mathbf{a}) \quad \forall \mathbf{s}\in S, \mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}} \\ & \mathbf{U},\mathbf{D} \geq \mathbf{0}, \quad \beta\in\mathbb{R}, \end{aligned}$$

donde,

$$\mathbb{E}_\alpha[u_{hgcjl}] = \sum_{\mathbf{s}\in S}\alpha(\mathbf{s})u_{hgcjl}(\mathbf{s}) \quad \forall h,g,c,j,l \qquad \mu_{hgcjl}(\mathbf{s},\mathbf{a}) = u_{hgcjl}(\mathbf{s}) - \gamma\sum_{\mathbf{s}'\in S}p(\mathbf{s}'|\mathbf{s},\mathbf{a})u'_{hgcl}(\mathbf{s},\mathbf{a}) \quad \forall h,g,c,j,l$$

$$\mathbb{E}_\alpha[d_{hgc}] = \sum_{\mathbf{s}\in S}\alpha(\mathbf{s})d_{hgc}(\mathbf{s}) \qquad \forall h,g,c \qquad \delta_{hgc}(\mathbf{s},\mathbf{a}) = d_{hgc}(\mathbf{s}) - \gamma\sum_{\mathbf{s}'\in S}p(\mathbf{s}'|\mathbf{s},\mathbf{a})d'_{hgc}(\mathbf{s},\mathbf{a}) \qquad \forall h,g,c$$

A pesar de que las $HGC^2L+HGC+1$ variables en (5.28) son significativamente menores en cantidad que las dimensiones de estado, la cantidad de restricciones sigue siendo un problema. Notemos que existe una restricción por cada par $(\mathbf{s},\mathbf{a})$, por lo que conviene resolver el dual de (5.28), modelo al cual llamaremos $DALP_{UTI}$, usando generación de columnas. El pseudo-código utilizado para resolver este problema es similar al utilizado para resolver el primer problema, y se puede observar en el Algoritmo 3.

$$\begin{aligned} DALP_{UTI}) \quad \min_{\pi} \quad & \sum_{\mathbf{s}\in S}\sum_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}} c(\mathbf{s},\mathbf{a})\pi(\mathbf{s},\mathbf{a}) \\ \text{s.a} \quad & (1-\gamma)\sum_{\mathbf{s}\in S}\sum_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}}\pi(\mathbf{s},\mathbf{a}) = 1 \end{aligned} \tag{5.29}$$

$$\sum_{\mathbf{s}\in S}\sum_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}} \mu_{hgcjl}(\mathbf{s},\mathbf{a})\pi(\mathbf{s},\mathbf{a}) \geq \mathbb{E}_{\alpha}[u_{hgcjl}] \quad \forall h,g,c,j,l$$

$$\sum_{\mathbf{s}\in S}\sum_{\mathbf{a}\in A_{\mathbf{s}}} \delta_{hgc}(\mathbf{s},\mathbf{a})\pi(\mathbf{s},\mathbf{a}) \geq \mathbb{E}_{\alpha}[d_{hgc}] \quad \forall h,g,c$$

$$\pi \geq \mathbf{0}.$$

Algoritmo 3 Generación de columnas

1: Obtener un conjunto inicial de pares estado-acción factible $\mathcal{P}$ usando el enfoque de fase 1 presentado en el Algoritmo 4.
2: Definir e instanciar la variable $PV = \infty$.
3: **mientras** $PV > 10^{-5}$ **hacer**
4: Resolver la versión restringida de (5.29), que considera solamente el conjunto de columnas actual $\mathcal{P}$.
5: Determinar β, $\mathbf{U}$ y $\mathbf{D}$ como los precios sombra de las restricciones duales correspondientes.
6: Resolver (5.30) usando los precios sombras actuales y almacenar el valor objetivo óptimo en PV.
7: **si** $PV > 0$ **, entonces**
8: Elegir el par estado-acción que genera PV.
9: Calcular $\mu(\mathbf{s},\mathbf{a})$, $\delta(\mathbf{s},\mathbf{a})$ y $c(\mathbf{s},\mathbf{a})$, y considerarlo una columna.
10: Actualizar $\mathcal{P}$ agregando la columna recién calculada.
11: **fin del si**
12: **fin del mientras**

Algoritmo 4 Enfoque de fase 1 para obtener un conjunto inicial de columnas factibles

1: Comenzar con un conjunto de pares estado-acción $\mathcal{P} = \emptyset$.
2: Resolver (5.31) y almacenar el valor objetivo óptimo en z_{master}.
3: **mientras** $z_{master} > 0$ **hacer**
4: Considerar β, $\mathbf{U}$ y $\mathbf{D}$ como los precios sombras de las restricciones duales correspondientes.
5: Resolver (5.32) usando los precios sombras actuales.
6: Seleccionar el par estado-acción obtenido como la solución óptima.
7: Calcular $\mu(\mathbf{s},\mathbf{a})$, $\delta(\mathbf{s},\mathbf{a})$ y $c(\mathbf{s},\mathbf{a})$, y considerarlo como una columna.
8: Actualizar $\mathcal{P}$ agregando la columna recién calculada.
9: Resolver (5.31), y almacenar el valor óptimo del problema resuelto en z_{master}.
10: **fin del mientras**

El algoritmo itera agregando al conjunto de columnas factibles el par estado-acción más violado según la solución de (5.30). Estas iteraciones continúan hasta que ninguna restricción del primal es violada (criterio de parada 10^{-5}).

$$PrDALP_{UTI}) \quad \max \quad (1-\gamma)\beta + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C}\sum_{j\in C}\sum_{l=1}^{L} \mu_{hgcjl}(\mathbf{s},\mathbf{a})U_{hgcjl} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C} \delta_{hgc}(\mathbf{s},\mathbf{a})D_{hgc} - c(\mathbf{s},\mathbf{a}) \quad (5.30)$$

$$\text{s.a} \quad (5.18) - (5.20)$$

$$\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{u}, \mathbf{d} \in \mathbb{Z}_0^+.$$

Una vez más, el primer paso del algoritmo consiste en determinar un conjunto de pares estado-acción factibles con el que empezar el algoritmo de generación de columnas. Para ello, se utilizó nuevamente una fase 1 similar a la utilizada en la Sección 5.1, pero ajustada para incluir los nuevos elementos de la formulación. Esta se encuentra detallada en el Algoritmo 4. Este enfoque considera, en sus iteraciones, resolver los modelos (5.31) y (5.32) en su lugar, hasta que una solución factible para (5.29) es encontrada. En otras palabras, el algoritmo de fase 1 itera hasta que todas las variables de holgura a^β, a^U_{hgl} y a^D_{hg} en (5.31) sean iguales a cero.

$$\begin{aligned}
\min_{\pi \geq \mathbf{0}, \mathbf{a} \geq \mathbf{0}} \quad & a^\beta + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \sum_{j \in C} \sum_{l=1}^{L} a^U_{hgcjl} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} a^D_{hgc} && (5.31)\\
\text{s.a} \quad & (1-\gamma) \sum_{p \in \mathcal{P}} \pi_p + a^\beta = 1 \\
& \sum_{p \in \mathcal{P}} \mu_{phgcjl} \pi_p + a^U_{hgcjl} \geq \mathbb{E}_\alpha[u_{hgcjl}] && \forall h, g, c, j, l \\
& \sum_{p \in \mathcal{P}} \delta_{phgc} \pi_p + a^D_{hgc} \geq \mathbb{E}_\alpha[d_{hgc}] && \forall h, g, c.
\end{aligned}$$

$$\max_{\substack{(\mathbf{s},\mathbf{a}) \in \\ S \times A_\mathbf{s}}} \quad (1-\gamma)\beta + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \sum_{j \in C} \sum_{l=1}^{L} \mu_{hgcjl}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) U_{hgcjl} + \sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} \sum_{c \in C} \delta_{hgc}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) D_{hgc} \tag{5.32}$$

La estructura de ambos problemas de pricing, (5.30) y (5.32), siguen siendo la de un problema de flujo en redes (demostración equivalente a la ya presentada), por lo que es posible relajar la integralidad de sus variables de forma de resolverlos más rápido.

El algoritmo entrega como resultado los valores óptimos $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$ que definen una nueva política óptima *aproximada* (AOP), esta vez asociada al problema que considera

transferencia de pacientes de diversa complejidad. Si se reemplaza (5.27), definida por $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$, en el lado derecho de las ecuaciones de Bellman y se ignoran los términos constantes, se llega al siguiente modelo de programación entera, que define la AOP:

$$\mathrm{d}^*(\mathbf{s}) \in \arg\min_{\mathbf{a}\in A_\mathbf{s}} \left\{ \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{c\in C}\sum_{p=1}^{P} Y_{hgcp}y_{hgcp} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{c\in C}\sum_{g=1}^{G}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j\in C} Z_{hgcij}z_{hgcij} \right\}, \tag{5.33}$$

donde

$$\begin{aligned} Y_{hgcp} &= k_{hgcp} - \gamma U^*_{hgcc1} && \forall h, g, c, p \\ Z_{hgcij} &= f_{higc} + \gamma U^*_{igcj1} - \gamma U^*_{hgcc1} && \forall h, i, g, c, j. \end{aligned}$$

Los coeficientes que definen (5.33), y por lo tanto esta AOP, se pueden interpretar intuitivamente de la siguiente manera. Por un lado, tomar una decisión y_{hgcp} considera el costo de derivar a un paciente de cierta complejidad a una clínica privado, k_{hgcp}, y el beneficio de no haber aceptado ese paciente y de no tener una cama de esa complejidad ocupada en el futuro γU^*_{hgcc1}. Por el otro, cada decisión z_{hgcij} equilibra el costo de transferir un paciente desde el hospital h al hospital i y el costo de que el hospital i se quede con el paciente de complejidad c ocupando una cama de complejidad j en el futuro, $f_{higc} + \gamma U^*_{igcj1}$, contra el costo futuro descontado de ingresarlo en el hospital h al que llegó en la cama de complejidad que le corresponde, γU^*_{hgcc1}. Así, en lugar de registrar la decisión aproximada óptima para cada estado posible, se puede resolver (5.33) en forma diaria para determinar la acción a tomar. A pesar de que (5.33) es un modelo más complejo que (5.15), puede ser implementado y resuelto de forma fácil en unos cuantos segundos.

El algoritmo de generación de columnas y el modelo que define esta AOP fueron implementados en GAMS 23.8.1 y resueltos con CPLEX 12.4 como solver.

5.3.3. Análisis sobre la AOP para una instancia diseñada

En esta sección se analizarán las principales características de esta nueva política óptima aproximada sobre una pequeña instancia diseñada de forma arbitraria. Lo anterior con

el fin de facilitar el análisis y presentación de resultados. Se analizará primero las acciones sugeridas por la AOP en términos de los valores de Y_{hgcp} y Z_{hgcij}, para luego analizar cómo la política obtenida varía ante diferentes costos y niveles de congestión del sistema.

5.3.3.1. Análisis sobre la política óptima aproximada

En esta sección se ilustran las principales características y el desempeño de esta AOP para un nuevo **caso base**. Para ello, nuevamente se asume una tasa de llegada promedio $\lambda_{hgc}, \forall h, g, c$, y que la salida de cada paciente sigue un proceso de Bernoulli con probabilidad de éxito (alta del paciente) $\rho_{hgcl}, \forall h, g, c, l$. En esta instancia se consideran $|C| = 2$ tipos de pacientes: los pacientes de alta complejidad $c = UCI$ y los de baja complejidad $c = UTI$.

El nuevo caso base considera que las tasas de llegada y tiempos de estadía promedio de los pacientes UCI son los mismos que los ilustrados en la Tabla 5.1, y que la cantidad de camas UCI disponibles son las indicadas en 5.1.3.1 (página 42). Sin embargo, la cantidad de camas UTI disponibles para cada uno de los cuatros hospitales es 10, 12, 15 y 18 camas, respectivamente. Además, los parámetros que definen a los pacientes UTI se listan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Información de las tasas de llegada y tiempos de estadía utilizados para pacientes UTI en el caso base para el análisis de las características de la AOP.

(a) Tasas de llegada a la UTI en pacientes/día ($\lambda_{hg(UTI)}$).

		GRD	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	0,84	0,74
	$h = 2$	1,04	0,77
	$h = 3$	1,41	1,24
	$h = 4$	1,31	1,11

(b) Largos de estadía promedio en cantidad de días en la UTI, asociados con $\rho_{hg(UTI)l}$.

		GRD	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	9,44	4,20
	$h = 2$	8,90	4,04
	$h = 3$	9,31	3,54
	$h = 4$	9,28	3,93
Promedio		9	4

(c) Utilización implícita (implied utilization) en la UTI, como porcentaje[7].

		Util. Implícita
Hospital	$h = 1$	110,38 %
	$h = 2$	103,06 %
	$h = 3$	116,78 %
	$h = 4$	91,77 %
Global		104,44 %

Para este conjunto de datos asociados a pacientes UTI, el hospital $h = 2$ es el que atiende más eficientemente pacientes del grupo $g = 1$, mientras que el hospital $h = 3$ es el que lo hace para los pacientes del grupo $g = 2$. El hospital más ineficiente es el hospital $h = 1$, pues presenta mayores tiempos de estadía para ambos grupos de diagnóstico. El hospital $h = 3$ es el hospital más congestionado, seguido por el $h = 1$. El hospital $h = 2$ ya se encuentra con un poder resolutivo cercano a su demanda promedio, mientras que el hospital $h = 4$ nuevamente es el que tiene la mayor capacidad disponible, en promedio.

Los costos utilizados siguen una estructura similar a la del problema anterior. Sin embargo, cabe recordar que ahora los precios son relativos al costo de atender a un paciente UTI en el hospital al que llegó. Derivar y atender a un paciente UTI cuesta $k_{hg(UTI)p} = 6\,000, \forall h, g, p$ más de lo que cuesta atenderlo en el sector público, mientras que derivar y atender a un paciente UCI cuesta $k_{hg(UCI)p} = 9\,400, \forall h, g, p$ más de lo que cuesta atender a un paciente UTI en el sector público. Por otro lado, atender a un paciente UCI es considerado $1\,000$ más caro que a uno UTI, y el costo de ambulancia es considerado como el mismo que para el problema anterior. Por lo mismo, transferir a un paciente UTI cuesta $f_{hig(UTI)} = 150, \forall h, i, g$ (con $h \neq i$), mientras que atenderlo en el hospital al que llega cuesta $f_{hhg(UTI)} = 0, \forall h, g$. Por otro lado, transferir y atender a un paciente UCI cuesta $f_{hig(UCI)} = 1\,150$ (con $h \neq i$), mientras que atender a un paciente UCI en el hospital al que llegó cuesta $f_{hhg(UCI)} = 1\,000, \forall h, g$ más que atender a uno UTI.

Interpretación del caso base para la política

Los valores de los coeficientes Y_{hgcp} y Z_{hgcij} obtenidos para el caso base son presentados en la Tabla 5.12. Dado el reajuste de costos realizado para simplificar la interpretación, hay que notar que, por construcción, $Z_{hg(UTI)h(UTI)} = 0$, es decir, el valor del coeficiente asociado a aceptar a un paciente UTI en una cama de complejidad UTI en el hospital al que llegó es igual a cero. Así, para interpretar correctamente la política dada por (5.33), se debe buscar en cada grupo, el menor valor de coeficiente posible. Es decir, la política sugiere que un paciente del grupo g con complejidad c que llegó

al hospital h sea tratado en una cama de complejidad $\hat{\jmath}$ en el hospital $\hat{\imath}$ o en la clínica $\hat{p}$ asociado con el menor valor entre $Z_{hgc\hat{\imath}\hat{\jmath}}$ e $Y_{hg\hat{c}\hat{p}}$, donde $(\hat{\imath},\hat{\jmath}) \in \arg\min_{(i,j)}\{Z_{hgcij}$: hospital i tiene camas de complejidad j disponibles$\}$ (siempre que comp$(\hat{\jmath}) \geq$ comp(c)), y $(\hat{c},\hat{p}) \in \arg\min_{(c,p)}\{Y_{hgcp}\}$. Incluso cuando ocurra que el hospital al que llega un paciente tiene camas de la complejidad correspondiente disponibles, si el resultado indica otro hospital u otra complejidad, o incluso si indica una clínica, la AOP sugiere que es preferible realizar dicha transferencia o derivación en vez de internar el paciente en la cama y lugar que coincida con su complejidad y llegada. Sin embargo, para el caso de la UTI, si el resultado de estos mínimos no es negativo, entonces la decisión por defecto será hospitalizar al paciente en una cama UTI en el hospital público h al que llegó. De igual forma, para el caso de un paciente UCI, si el resultado de estos mínimos coincide con el hospital al que llegó, la decisión por defecto será hospitalizarlo en una cama UCI en el hospital público h al que llegó.

Tabla 5.12. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base UCI-UTI.

(a) Valores del coeficiente $Z_{h,g,UCI,i,UCI}$, asociado a transferencias de pacientes UCI en hospitales públicos.

		GRD $g=1$				GRD $g=2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de llegada	$h=1$	1000,00	1150,00	1347,82	1150,00	1000,00	1209,26	882,17	1029,17
	$h=2$	1150,00	1000,00	1347,82	1150,00	1090,74	1000,00	822,91	969,91
	$h=3$	952,18	952,18	1000,00	952,18	1417,83	1477,09	1000,00	1297,00
	$h=4$	1150,00	115,000	1347,82	1000,00	1270,83	1330,09	1003,00	1000,00

(b) Valores del coeficiente $Y_{h,g,UCI,1}$, asociado a derivaciones a clínicas privadas de pacientes UCI.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	1315,00	4738,52
	$h=2$	1315,00	4679,26
	$h=3$	1117,18	5006,35
	$h=4$	1315,00	4859,35

(c) Valores de los coeficientes $Z_{h,g,UTI,ij}$ e $Y_{h,g,UTI,1}$, asociado respectivamente a transferencias y derivaciones de pacientes UTI.

			$Z_{h,g,UTI,i,UCI}$				$Z_{h,g,UTI,i,UTI}$				$Y_{h,g,UTI,p}$
			Cama UCI en hosp. de destino				Cama UTI en hosp. de destino				A privado
			$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$p=1$
GRD $g=1$	Hosp. de llegada	$h=1$	795,84	863,27	1085,89	922,13	0,00	150,00	346,85	150,00	267,00
		$h=2$	945,84	713,27	1085,89	922,13	150,00	0,00	346,85	150,00	267,00
		$h=3$	748,99	666,42	739,04	725,27	−46,85	−46,85	0,00	−46,85	70,15
		$h=4$	945,84	863,27	1085,89	772,17	150,00	150,00	346,85	0,00	267,00
GRD $g=2$	Hosp. de llegada	$h=1$	414,3	572,75	224,69	418,83	0,00	195,74	−114,33	32,67	3015,47
		$h=2$	518,57	377,01	339,02	373,09	104,26	0,00	−160,07	−13,07	2969,73
		$h=3$	828,63	837,08	339,02	683,16	414,33	460,07	0,00	297,00	3279,80
		$h=4$	681,63	690,08	342,02	386,16	267,33	313,07	3,00	0,00	3132,80

A modo de ejemplo, se puede analizar los casos destacados de la Tabla 5.12.

Primero, analicemos las Tablas 5.12a y 5.12b, que muestran los coeficientes obtenidos solamente para los pacientes de complejidad UCI. Dado que estos solamente pueden ser atendidos en camas UCI, el procedimiento para interpretarlo es similar al presentado en 5.1.3.1 (página 44). Si nos centramos en el caso destacado con gris claro, se puede observar que la AOP sugiere en algunos casos el proceder regular e intuitivo que realiza, por ejemplo, la UGCC en Chile con los pacientes UCI, sin embargo, agregándole un orden de preferencia si es que hay que transferir. Si llega un paciente $c = UCI$ del grupo $g = 2$ al hospital $h = 3$, el proceder es exactamente igual al caso sin considerar otras complejidades.

En las mismas tablas, el caso destacado en gris oscuro ilustra que la AOP obtenida para los pacientes UCI sigue indicando proactividad para algunos movimientos. Dado que el precio base de internar y cuidar a un paciente UCI en el hospital público al que llegó es $Z_{h,g,UCI,h,UCI} = 1000, \forall h, g$, el hecho de que existan valores menores a 1000 indica la existencia de transferencias proactivas sugeridas. En particular, si un paciente $c = UCI$ del grupo $g = 2$ llega al hospital $h = 2$, el administrador central deberá intentar primero transferirlo a una cama UCI del hospital $i = 3$ ($Z_{2,2,UCI,3,UCI} = 822{,}91$). Si este no cuenta con capacidad disponible, se deberá intentar transferir a una cama UCI del hospital $i = 4$ ($Z_{2,2,UCI,4,UCI} = 969{,}91$). Si tampoco hay capacidad ahí, se deberá internar en una cama UCI en el hospital al que llegó ($Z_{2,2,UCI,2,UCI} = 1\,000$). Si no, transferirlo a una cama UCI del hospital $i = 1$ ($Z_{2,2,UCI,1,UCI} = 1\,090{,}74$) y, como última opción, a la clínica ($Y_{2,2,UCI,1} = 4\,679{,}26$).

Por otro lado, la interpretación de la política para el caso que considera pacientes UTI sigue la misma lógica, solamente que ahora hay más coeficientes que deben ser comparados (como se puede apreciar en la Tabla 5.12c), dado que un paciente de esta complejidad, según lo propuesto, puede atenderse en una cama UTI o en una cama UCI. Para analizar este caso, hay que recordar que el coeficiente asociado a internar a un paciente UTI en una cama UTI en el hospital al que llegó es igual a 0.

Veamos primero el caso destacado en gris claro, que ilustra un proceder similar al normal, excepto por el hecho de que se intenta evitar la transferencia a un hospital. Si se analiza la tabla, se puede entender que si un paciente $c = UTI$ del grupo $g = 1$ llega al hospital $h = 4$, entonces el administrador central deberá intentar primero admitirlo en la UTI correspondiente ($Z_{4,1,UTI,4,UTI} = 0$). Si este hospital no dispone de camas UTI, entonces se deberá intentar transferir a una cama UTI del hospital $i = 1$ o $i = 2$, indistintamente ($Z_{4,1,UTI,1,UTI} = Z_{4,1,UTI,2,UTI} = 150$). Si ninguno de estos hospitales tiene camas UTI disponibles, se deberá derivar al paciente a una clínica privada, sin intentar transferir al hospital $i = 3$ ($Y_{4,1,UTI,1} = 267 < Z_{4,1,UTI,3,UTI} = 346{,}85$). Es de notar que la ocupación de camas UCI por parte de pacientes UTI en este caso ni siquiera fue considerada, debido a que genera un mejor desempeño que estos pacientes sean atendidos en el privado a que sean atendidos en el sistema público ocupando una cama UCI.

Por otro lado, no ocurre lo mismo para el caso destacado en gris oscuro. Si un paciente $c = UTI$ del grupo $g = 2$ llega al hospital $h = 2$, entonces lo primero a intentar por parte del administrador debería ser, independiente de la disponibilidad de camas UTI del hospital $h = 2$, transferirlo a una cama UTI del hospital $i = 3$ ($Z_{2,2,UTI,3,UTI} = -160{,}07$). Si ese hospital no tiene ninguna cama disponible, entonces se debe intentar transferir a una cama UTI del hospital $i = 4$ ($Z_{2,2,UTI,4,UTI} = -13{,}07$). Si no hay camas UTI disponibles, se debe intentar internar el paciente en una cama UTI del hospital $i = 2$ al que llegó ($Z_{2,2,UTI,2,UTI} = 0$), y si eso tampoco resulta por falta de camas UTI, se debe intentar internar al paciente en una cama UTI del hospital $i = 1$ ($Z_{2,2,UTI,1,UTI} = 104{,}26$). Si eso tampoco funciona es donde ocurre algo interesante. En lugar de derivarlo al privado por falta de camas UTI en el sistema, la política prefiere intentar ocupar camas UCI para este paciente UTI, dado que esto generaría un menor gasto esperado que derivarlo a un privado. Es decir, si no hay camas UTI disponibles en el sistema, se debe intentar transferir a una cama UCI del hospital $i = 3$ ($Z_{2,2,UTI,2,UCI} = 339{,}02$). Si no hay, se debe intentar transferir a una cama UCI del hospital $i = 4$ ($Z_{2,2,UTI,4,UCI} = 373{,}09$). Si eso tampoco resulta, a una UCI del hospital $i = 2$ ($Z_{2,2,UTI,2,UCI} = 377{,}01$), y si eso tampoco, a una UCI del

hospital $i = 1$ ($Z_{2,2,UTI,1,UCI} = 518{,}57$). Es recién luego de intentar internar al paciente en todos los hospitales, que se considera derivar al privado ($Y_{2,2,UTI,1} = 2\,969{,}73$).

Esta AOP también presenta numerosas propiedades que permiten gestionar de forma más eficiente y económica las transferencias de pacientes entre hospitales públicos y la derivación a clínicas, ahora ante la presencia de distintas complejidades. Las siguientes observaciones son dignas de hacer notar:

- Similar al caso con una sola complejidad, a pesar de que el costo de ambulancia y de atención f_{higc} es el mismo, dada una complejidad c, para cualquier par de hospitales públicos $h \neq i$ y cualquier grupo g, es interesante notar la política sugiere un orden de preferencia de ocupación del sistema para cada caso (grupo/complejidad). Esto ocurre porque la AOP considera no sólo los costos, si no que también las ocupaciones promedio y las eficiencias resolutivas de cada grupo y complejidad.
- También existen transferencias proactivas en algunos casos, a pesar de que el costo de traslado a ambulancia entre hospitales sea estrictamente positivo. Sin embargo, al igual que antes, esto cobra sentido si se considera que los tiempos de estadía de ciertos grupos (e.g., $g = 1$) pueden ser más largos y que las tasas de llegada y el número de camas disponibles promedio pueden variar de un hospital a otro.
- Si bien no son proactivas para este caso, es interesante notar la sugerencia de ocupación de camas UCI por pacientes UTI, es decir, el uso de camas de mayor complejidad por pacientes de menor complejidad. Sin embargo, tiene sentido si se considera que los pacientes UTI terminan ocupando menos tiempo en promedio una cama crítica. Así, la AOP determina, dado la diferencia en los costos de atención y en la demanda de recursos de pacientes UCI y UTI, que es conveniente atender a más pacientes UTI a menor costo que a más pacientes UCI a mayor costo. Y así, en promedio, el gasto termine siendo menor y la cantidad de pacientes a atender a nivel global mayor.

- La Tabla 5.13 presenta los valores obtenidos para los coeficientes Y_{hgcp} y Z_{hgcij} si $f_{higc} = 100, \forall h \neq i$. Este caso, al igual que para el primer problema, ayuda a ilustrar que la AOP también puede dar sugerencias de proactividad en las decisiones de derivación para este problema. Por ejemplo, se puede apreciar proactividad en la derivación de pacientes UCI (e.g., $h = 3, g = 1$ en la Tabla 5.13b, donde $Y_{3,1,UCI,1} = 972{,}93 < 1000$), esto a pesar de que pareciera ser más caro que admitirlos en el hospital al que llegaron o transferirlos a otro público. A su vez, se puede también apreciar proactividad en la derivación de pacientes UTI (e.g., , $h = 3, g = 1$ en la Tabla 5.13c, donde $Y_{3,1,UTI,1} = -90{,}09 < 0$), aunque también tenga un costo muy superior al de admitirlo en el mismo hospital al que llegó. Una vez más, dada la congestión de los hospitales, las diferencias en las tasas de llegada y tiempos de estadía más largos para algunos grupos y complejidades, derivar ciertos pacientes a la clínica puede resultar ser más eficiente que internarlos en el hospital potencialmente altamente congestionado al que llegaron. La política nuevamente reconoce esta situación, a pesar de que haya más alternativas de camas en los que internar a un paciente UTI. El Anexo B.3 presenta un ejemplo simple de esta propiedad.

En particular, hay dos resultados muy interesantes para este caso que vale la pena resaltar. El primero es que la política, al igual que en el caso con una sola complejidad, sigue sugiriendo la especialización de algunos hospitales en el tratamiento de ciertos grupos de diagnóstico, dado que genera un orden de hospitales en el caso de que haya que transferir un paciente. Esta especialización, como fue mencionado anteriormente, podría mejorar la atención y disminuir los tiempos de estadía de pacientes (y por ende, permitiría atender a un número aún mayor de pacientes).

El segundo resultado es el hecho de que $\min_{(h,g,i)}\{Z_{h,g,UTI,i,UCI}\} > 0$. Es decir, para este nivel de costos no existe ninguna ocupación o transferencia proactiva de pacientes UTI a camas UCI, ocurriendo estas sólo de forma reactiva. Esto cobra sentido si se tiene en cuenta que (1) las camas UCI en realidad son las más flexibles, dado que permiten

Tabla 5.13. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base UCI-UTI, con $f_{higc} = 100, \forall h, i, g, c : h \neq i$.

(a) Valores del coeficiente $Z_{h,g,UCI,i,UCI}$, asociado a transferencias de pacientes UCI en hospitales públicos, con $f_{higc} = 100, \forall h, i, g, c : h \neq i$.

		GRD $g=1$				GRD $g=2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de llegada	$h=1$	1000,00	1100,00	1393,07	1100,00	1000,00	1159,62	880,44	978,44
	$h=2$	1100,00	1000,00	1393,07	1100,00	1040,38	1000,00	820,82	918,82
	$h=3$	806,93	806,93	1000,00	806,93	1319,56	1379,18	1000,00	1198,00
	$h=4$	1100,00	1100,00	1393,07	1000,00	1221,56	1281,18	1002,00	1000,00

(b) Valores del coeficiente $Y_{h,g,UCI,1}$, asociado a derivaciones a clínicas privadas de pacientes UCI, con $f_{higc} = 100, \forall h, i, g, c : h \neq i$.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	1266,00	4710,27
	$h=2$	1266,00	4650,65
	$h=3$	972,93	4929,83
	$h=4$	1266,00	4831,83

(c) Valores de los coeficientes $Z_{h,g,UTI,ij}$ e $Y_{h,g,UTI,1}$, asociados respectivamente a transferencias y derivaciones de pacientes UTI, con $f_{higc} = 100, \forall h, i, g, c : h \neq i$.

			$Z_{h,g,UTI,i,UCI}$				$Z_{h,g,UTI,i,UTI}$				$Y_{h,g,UTI,p}$
			Cama UCI en hosp. de destino				Cama UTI en hosp. de destino				A privado
			$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$p=1$
GRD $g=1$	Hosp. de llegada	$h=1$	786,41	803,34	1103,04	862,55	0,00	100,00	408,09	100,00	218,00
		$h=2$	886,41	703,34	1103,04	862,55	100,00	0,00	408,09	100,00	218,00
		$h=3$	578,32	495,25	694,95	554,46	−208,09	−208,09	0,00	−208,09	−90,09
		$h=4$	886,41	803,34	1103,04	762,55	100,00	100,00	408,09	0,00	218,00
GRD $g=2$	Hosp. de llegada	$h=1$	409,39	517,89	202,46	363,04	0,00	146,13	−116,33	−18,33	2989,96
		$h=2$	463,27	371,76	156,33	316,91	53,87	0,00	−162,46	−64,46	2943,83
		$h=3$	725,73	734,22	318,79	579,37	316,33	362,46	0,00	198	3206,29
		$h=4$	627,73	636,22	320,79	381,37	218,33	264,46	2,00	0,00	3108,29

atender a una mayor variedad de pacientes y, por ende, lidian de mejor manera con la variabilidad asociada a tener dos complejidades de pacientes (y no sólo una, como sería el caso de las camas UTI); y (2) los pacientes de complejidad UCI son los más caros de tercerizar. Por lo mismo, dado que los pacientes UCI sólo pueden ser atendidos en camas UCI, la política sugiere no ocupar de forma proactiva estas camas si la penalización reactiva termina siendo muy alta (esto también se puede observar en el ejemplo ilustrativo del Anexo B.3). Sin embargo, sí hay algunos casos en que prefiere ocupar camas UCI del hospital al que llega antes que transferirlo a otro hospital (i.e., para $g = 2$ y $h = 3$, al preferirse que un paciente ocupe cama UCI antes que transferirlos al hospital $i = 2$).

Para ver que la política no siempre evita ocupar proactivamente camas UCI con pacientes UTI, sino que existen casos en que sí lo podría preferir hacer, se sugiere revisar el ejemplo descrito en el Anexo C.3.

Desempeño de la política para el caso base

A continuación se evalúa el desempeño de la política óptima aproximada que se analizó en la sección anterior. Será denominada **AOP-AM**, al ser una AOP que permite movimientos de pacientes de menor complejidad a camas de mayor complejidad (*allowing movements*, de ahí la sigla AM). Para evaluar su desempeño, se realizaron simulaciones que permiten comparar esta política resultante con otras tres políticas:

- **AOP-FM:** Política óptima aproximada que prohíbe movimientos de pacientes de menor complejidad a camas de mayor complejidad (*forbidding movements*, de ahí la sigla FM). En otras palabras, en esta política, los pacientes sólamente pueden ocupar camas asociadas a sus respectivas complejidades, dejando las camas UCI solamente para los pacientes de la unidad UCI.
- **MP-AM:** Esta es una política miope (MP), es decir, que considera solamente el presente (costo inmediato), ignorando cualquier impacto que las decisiones de hoy puedan tener en el desempeño futuro del sistema. Esta política es, sin embargo, levemente distinta a la que ocupan los hospitales hoy en día, dado que se permite que pacientes de menor complejidad ocupen camas de mayor complejidad. Es decir, no se considera el impacto en el futuro, pero se comparte la capacidad de camas UCI entre pacientes UTI y pacientes UCI; mientras que las camas UTI quedan solamente para pacientes UTI.
- **MP-FM:** Esta también es una política miope (MP), pero que prohibe la ocupación de camas de mayor complejidad por pacientes de menor complejidad. Es decir, nuevamente la capacidad puede ser utilizada solamente para pacientes de la complejidad correspondiente. Esta política sería la que representa de mejor manera el proceder actual de los hospitales y la UGCC para el caso chileno.

En la Tabla 5.14 se comparan las tasas de ocupación resultantes al simular dichas políticas para la red de hospitales del caso base. Se simularon 100 réplicas de 3 años con un período transiente de un año, también utilizando Python-Gurobi. Se puede apreciar cómo la ocupación promedio disminuye al utilizar la AOP, al compararla con la política miope (92,17 % vs 90,31 % para el caso FM, y 92,78 % vs 90,66 % para el caso AM). Sin embargo, la comparación más interesante es la que se da al contrastar el desempeño de la propuesta de esta tesis (AOP-AM) contra la del proceder actual de la red de hospitales (MP-FM). Se aprecia que la ocupación general, una vez más, disminuye si se realizan movimientos de forma proactiva que vayan en beneficio de hacer un mejor uso de la eficiencia resolutiva de los hospitales.

Tabla 5.14. Comparación de la tasa de ocupación efectiva empírica de la política miope (MP) versus la política óptima aproximada (AOP) para el caso base, tanto permitiendo (AM) como prohibiendo (PM) que pacientes UTI ocupen camas UCI.

	MP-FM	AOP-FM	MP-AM	AOP-AM
Ocupación $h = 1$	93,30 %	94,50 %	93,46 %	95,13 %
Ocupación $h = 2$	92,42 %	93,02 %	92,71 %	93,43 %
Ocupación $h = 3$	92,91 %	80,34 %	93,89 %	81,30 %
Ocupación $h = 4$	90,79 %	94,37 %	91,55 %	94,02 %
Ocupación global	92,17 %	90,31 %	92,78 %	90,66 %

La Tabla 5.15 presenta diversos indicadores que permiten comparar el desempeño de todas las políticas. Como se puede apreciar, el hecho de tener proactividad produce una disminución en el número de pacientes que son internados directamente, lo que a su vez permite una disminución en la cantidad de derivaciones tanto de pacientes UCI como de pacientes UTI. Además, se logra el uso de camas UCI por pacientes UTI, sin embargo, para la AOP este no es un curso de acción que se suela explotar. Esto tiene explicación mediante los órdenes de ocupación dados por la política, mostrada en la Tabla 5.12.

Una segunda observación que podría ser más relevante es que, a pesar de haber más transferencias, el ahorro promedio en el costo descontado entre la propuesta de esta tesis

Tabla 5.15. Comparación entre la política miope (MP) y la AOP para el caso base permitiendo que pacientes UTI ocupen camas UCI (AM), o bien prohibiendo dichas ocupaciones (FM), con respecto a diversas medidas de desempeño. El Δ calcula el cambio percenutual en el indicador de MP-FM vs AOP-AM. El margen de error es el correspondiente a un nivel de confianza de 95 %.

	MP–FM	AOP–FM	MP–AM	AOP–AM	Δ %
Internado directo	6 265,6 ± 16,5	4 585,6 ± 12,7	6 529,7 ± 18,6	4 595,2 ± 12,9	–26,66 %
UCI intern. directo en UCI	2 231,5 ± 11,3	1 629,7 ± 7,9	1 900,9 ± 9,4	1 615,0 ± 7,7	–27,63 %
UTI intern. directo en UTI	4 034,0 ± 12,7	2 955,9 ± 11,0	4 258,6 ± 13,3	2 948,0 ± 11,2	–26,92 %
UTI intern. directo en UCI	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	370,1 ± 6,5	32,13 ± 1,6	–
Transferencias	1 685,0 ± 12,9	3 539,6 ± 12,0	1 552,2 ± 13,9	3 556,9 ± 8,3	+111,09 %
UCI transf. y atend. en UCI	683,2 ± 7,4	1 322,8 ± 6,5	812,4 ± 6,2	1 320,9 ± 3,6	+93,34 %
UTI transf. y atend. en UTI	1 001,7 ± 8,9	2 216,8 ± 9,8	634,8 ± 10,3	2 209,1 ± 9,3	+120,54 %
UTI transf. y atend. en UCI	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	105,1 ± 2,6	26,97 ± 1,4	–
Derivaciones	947,8 ± 17,3	798,6 ± 13,0	815,73 ± 16,1	771,66 ± 13,3	–18,58 %
Derivaciones UCI	349,6 ± 9,6	319,4 ± 8,1	551,0 ± 11,0	333,0 ± 8,3	–4,75 %
Derivaciones UTI	598,2 ± 14,1	482,3 ± 10,3	264,7 ± 8,8	438,7 ± 9,6	–26,66 %
Costo descontado	695 880 ± 23 874	640 821 ± 19 589	670 805 ± 23 550	633 286 ± 19 565	–8,99 %
Costo diario promedio	13 757 ± 172	12 809 ± 133	13 307 ± 175	12 645 ± 138	–8,08 %

(AOP-AM) y la que se utiliza actualmente (MP-FM) es de un 8,99 %, resultado estadísticamente significativo (valor $p < 0{,}0001$). Otro resultado relevante a destacar es el hecho de que sin proactividad, pero permitiendo que pacientes UTI ocupen camas reservadas para los pacientes de mayor complejidad se logra también un ahorro, esta vez de un 3,60 %. Así, es posible notar que, de todo el ahorro logrado para este ejemplo, un 40 % se puede obtener sin la aplicación de programación dinámica , sino que solamente compartiendo recursos de mayor complejidad. Sin embargo, se logra bastante más ahorro al utilizar las políticas de admisión, transferencia y derivación como las generadas con la metodología propuesta. Esto ocurre dado que la política, al descongestionar el sistema transfiriendo y derivando pacientes de forma proactiva, permite hacer un uso más eficiente de todas las camas disponibles (UCI y UTI) y tener más holgura para que el sistema pueda adaptarse a una gran variabilidad en la llegada y tiempos de estadía de los pacientes. Es por eso que tanto en la política AOP-FM como en la AOP-AM se logra un ahorro no menor.

La simulación tardó entre 15 y 19 minutos para cada política, en el mismo computador caracterizado para la simulación anterior.

5.3.3.2. Análisis de sensibilidad sobre el modelo

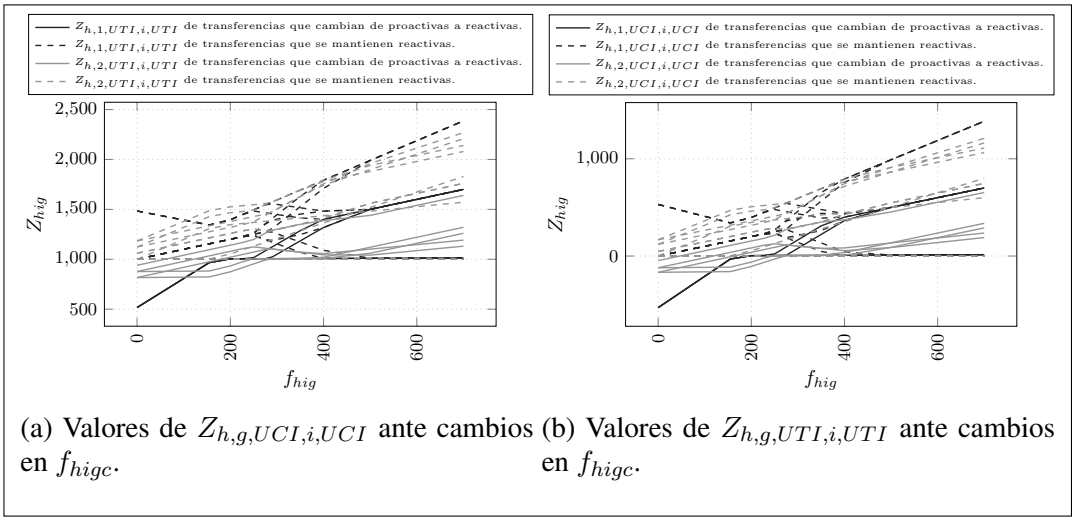
A continuación se analizará la sensibilidad del modelo y cómo va cambiando la política resultante a medida, que se cambian diversos aspectos de este. Primero, se analizará cómo afecta cada costo a la política. Luego, se analizará cómo va cambiando la política resultante a medida que se aumenta la proporción de camas de algún hospital. Finalmente, se aumentará la capacidad de dos hospitales (el más congestionado y el menos congestionado).

Debido a la cantidad mayor de análisis que se pueden hacer al respecto dada el número de aristas posibles en este problema, el análisis en este caso será más acotado que el realizado para el primer problema. Por lo mismo, no se analizará en detalle cada caso, sino que se expondrán los principales descubrimientos de forma general.

Análisis de costos

Cambio en el costo de transferencia de pacientes entre hospitales: Siguiendo la línea del análisis de costos utilizado en la Sección 5.1.3.2 (página 50), se procedió a ver cómo cambian las acciones sugeridas por la AOP ante variaciones de los costos de transferencia. Para esto, nuevamente se asume que los cambios afectan a $f_{hgic}, \forall h, g, i, c : h \neq i$ de igual forma, manteniendo todos los otros parámetros constantes.

La Figura 5.6 ilustra cómo se comporta el valor de coeficiente Z_{hgcij} ante cambios en los costos de transferencia. No es sorpresa notar que la forma de los gráficos, a medida que aumenta el costo f_{higc}, son bastante similares al asociado a este mismo análisis para el primer problema (ver Figura 5.3b). Esto respalda el análisis realizado en dicha sección, pues se aplica la misma lógica para este problema: a medida que va aumentando el costo de transferencia, hay algunos coeficientes Z_{hgcij} (los menos robustos) que pasan de tener valores negativos a tener valores positivos, haciendo que algunas transferencias sugeridas pasen de ser proactivas a reactivas.



(a) Valores de $Z_{h,g,UCI,i,UCI}$ ante cambios en f_{higc}.

(b) Valores de $Z_{h,g,UTI,i,UTI}$ ante cambios en f_{higc}.

Figura 5.6. Variación del valor del coeficiente Z_{hgcij} como resultado de cambios en el costo de transferencia interhospitalaria $f_{higc} \in [0, 700]$. Notar que $f_{hig} = 150$ para el caso base y que admitir un paciente UCI en el hospital de llegada tiene costo $f_{h,h,g,UCI} = 1000$.

Es importante mencionar que la acción de asignar pacientes UTI a camas UCI no se volvió proactiva para ningún valor f_{higc}.

Cambio en el costo privado de atención UCI: También se procedió a ver cómo cambian las acciones sugeridas por la AOP ante variaciones en el costo de derivación de pacientes UCI al privado, al igual que en el análisis de costos utilizado en la sección 5.1.3.2 (página 50). Para esto, nuevamente se asume que los cambios afectan a todos los $k_{h,g,UCI,p}, \forall h, g, p$ de igual forma, manteniendo todos los otros parámetros constantes.

Nuevamente ocurre que si el costo de derivación es bajo ($k_{hgcp} \in [0, 1000]$), entonces el costo futuro no tiene relevancia para el modelo, lo que implica que los pacientes UCI son derivados directamente al privado, al ser más barato atenderlos ahí que en un hospital público. De este modo, todas las camas del sistema quedan para pacientes UTI, por lo que hay sobreoferta de camas para este tipo de pacientes. La ocupación de camas por parte de pacientes UTI ocurre sin un costo futuro adicional. Todo esto queda representado en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso base UCI-UTI considerando un costo de derivación de pacientes UCI $k_{hg(UCI)p}$ con valores entre 0 y 1000, $\forall h, g, p$

(a) Valores del coeficiente $Z_{h,g,UCI,i,UCI}$, asociado a transferencias de pacientes UCI en hospitales públicos, con valores de $k_{hg(UCI)p}$ entre 0 y 1000, $\forall h, g, p$.

		GRD $g=1$				GRD $g=2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de llegada	$h=1$	1000,00	1150,00	1150,00	1150,00	1000,00	1150,00	1150,00	1150,00
	$h=2$	1150,00	1000,00	1150,00	1150,00	1150,00	1000,00	1150,00	1150,00
	$h=3$	1150,00	1150,00	1000,00	1150,00	1150,00	1150,00	1000,00	1150,00
	$h=4$	1150,00	1150,00	1150,00	1000,00	1150,00	1150,00	1150,00	1000,00

(b) Valores del coeficiente $Y_{h,g,UCI,1}$, asociado a derivaciones de pacientes UCI a clínicas privadas, con valores de $k_{hg(UCI)p}$ entre 0 y 1000, $\forall h, g, p$.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	$k_{hg(UCI)p}$	$k_{hg(UCI)p}$
	$h=2$	$k_{hg(UCI)p}$	$k_{hg(UCI)p}$
	$h=3$	$k_{hg(UCI)p}$	$k_{hg(UCI)p}$
	$h=4$	$k_{hg(UCI)p}$	$k_{hg(UCI)p}$

(c) Valores de los coeficientes $Z_{h,g,UTI,ij}$ e $Y_{h,g,UTI,1}$, asociados respectivamente a transferencias y derivaciones de pacientes UTI, con valores de $k_{hg(UCI)p}$ entre 0 y 1000, $\forall h, g, p$.

			$Z_{h,g,UTI,i,UCI}$				$Z_{h,g,UTI,i,UTI}$				$Y_{h,g,UTI,p}$
			Cama UCI en hosp. de destino				Cama UTI en hosp. de destino				A privado
			$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$p=1$
GRD $g=1$	Hosp. de llegada	$h=1$	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	6000,00
		$h=2$	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	6000,00
		$h=3$	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	6000,00
		$h=4$	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	6000,00
GRD $g=2$	Hosp. de llegada	$h=1$	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	6000,00
		$h=2$	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	6000,00
		$h=3$	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	6000,00
		$h=4$	150,00	150,00	150,00	0,00	150,00	150,00	150,00	0,00	6000,00

Para valores mayores de derivación de pacientes UCI, es cada vez más costoso, en términos de costo futuro esperado descontado, que pacientes UTI ocupen camas UCI. Este resultado es natural si se piensa que se estaría ocupando camas de pacientes cuya atención es cada vez más cara de atender en una clínica privada. Este fenómeno se puede apreciar en la Figura 5.7, en la cual el valor del coeficiente $Z_{h,g,UTI,i,UCI}$ sube para cada grupo de diagnóstico, siendo el del grupo ($g = 1$) el que aumenta más. Esta diferencia en la sensibilidad se debe a que este grupo de pacientes tiene un mayor tiempo de estadía promedio, lo que hace ocupar por mayor tiempo este valioso recurso.

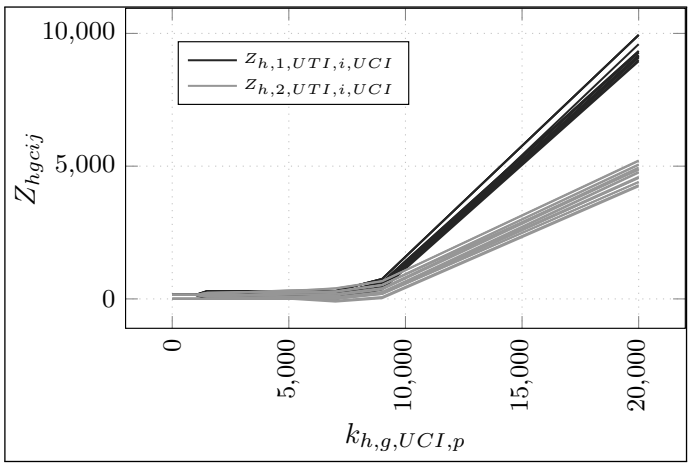
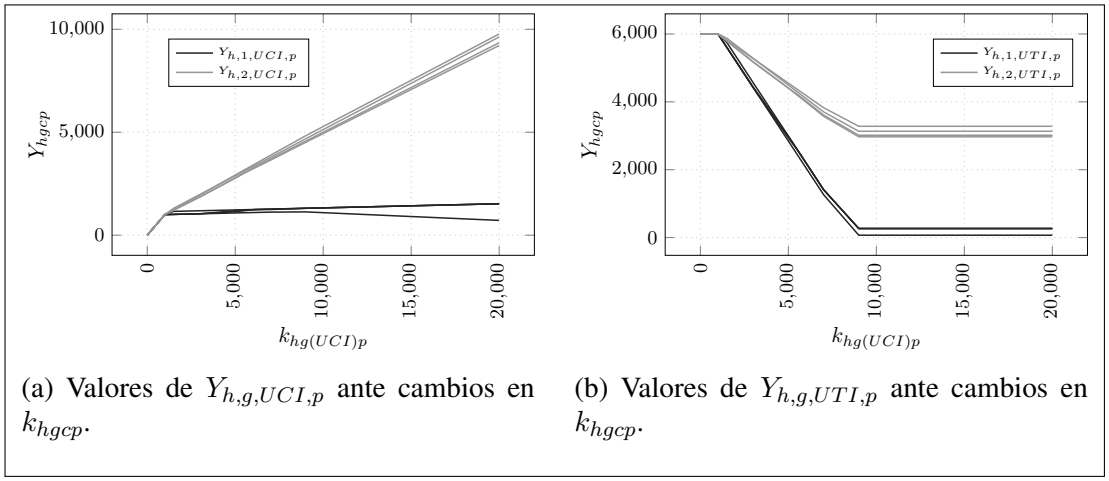


Figura 5.7. Variación del valor del coeficiente $Z_{h,g,UTI,i,UCI}$, asociado a la ocupación de camas UCI por pacientes UTI, como resultado de cambios en los costos de derivación de pacientes UCI $k_{h,g,UCI,p}, \forall h, g, p$.

Por último, al comparar el comportamiento de las políticas resultantes en cuanto a la derivación de pacientes UCI y UTI, se pudo apreciar un comportamiento contrario. A medida que aumenta el costo de derivación de pacientes UCI, mientras que (lógicamente) es cada vez más costoso mover pacientes UCI al privado, a su vez es cada vez más provechoso derivar pacientes UTI a privados (y por ende, cada vez menor el valor del coeficiente asociado). Esto se observa hasta que se ha logrado un equilibrio en el sistema. Todo esto se puede apreciar en la Figura 5.8.

Cambio en el costo privado de atención UTI: Se procedió a revisar también qué ocurre con las AOPs obtenidas a medida que se cambia el costo de atención en el privado, pero ahora solamente considerando la derivación de pacientes UTI, manteniendo el resto de los parámetros (y, por ende, el costo para los pacientes UCI) iguales al caso base y constantes. Nuevamente, se asume que los cambios afectan a todos los $k_{h,g,UTI,p}, \forall h, g, p$ de igual forma.

Lo más relevante que se descubrió en este análisis, como se ilustra en la Figura 5.9, es que, a medida que el costo de derivar a pacientes UTI al sector privado aumenta, el costo inmediato y futuro esperado descontado de asignar pacientes UTI a camas UCI es cada vez menor. Esto indica que cada vez es más preferible que pacientes UTI ocupen camas



(a) Valores de $Y_{h,g,UCI,p}$ ante cambios en k_{hgcp}.

(b) Valores de $Y_{h,g,UTI,p}$ ante cambios en k_{hgcp}.

Figura 5.8. Variación del valor del coeficiente Y_{hgcp} de derivación de pacientes como resultado de cambios en los costos de derivación $k_{hgcp} \in [0, 20\,000]$. Notar que $k_{h,g,UCI,p} = 9\,400$ para el caso base.

UCI, dado que la otra opción (derivarlos al privado) es cada vez más cara. Incluso, en algunos casos, de forma proactiva.

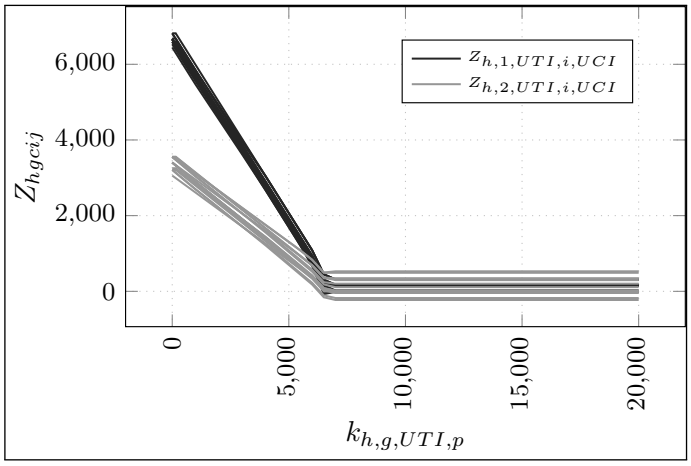


Figura 5.9. Variación del valor del coeficiente $Z_{h,g,UTI,i,UCI}$, asociado a la ocupación de camas UCI por pacientes UTI, como resultado de cambios en los costos de derivación de pacientes UTI $k_{h,g,UTI,p}, \forall h, g, p$.

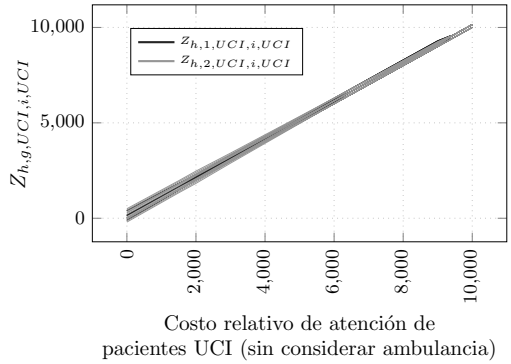
El análisis realizado con respecto al movimiento y derivación de pacientes UCI no trajo consigo ninguna conclusión interesante al respecto, por lo que no es incluida en esta sección. De igual forma, el análisis con respecto a la derivación de pacientes UTI resultó en algo completamente esperable: el costo corregido que incluye el costo inmediato y el

costo futuro esperado descontado de derivación de pacientes UTI aumenta a medida que aumenta el costo inmediato de derivación, teniendo un mayor costo para el grupo con mayor largo de estadía ($g = 1$). Dado lo intuitivo del resultado, no se profundizará más en este aspecto.

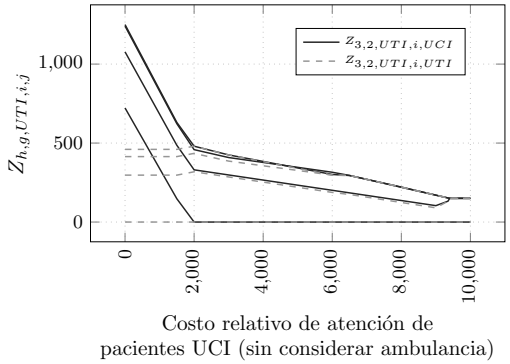
Cambio en el costo de resolución de pacientes UCI: También se realizó análisis de sensibilidad con respecto al costo de atender a un paciente UCI por sobre un paciente UTI. Este análisis se hizo manteniendo el resto de los parámetros iguales al caso base y constantes. Nuevamente, se asume que los cambios afectan a todos los $f_{h,i,g,UCI}, \forall h, i, g$ de igual forma.

En este caso, se observa que, mientras más relativamente caro sea atender a un paciente UCI, estos pacientes serán los más relevantes en términos de costo. Por lo mismo, la política sugiere atender cada vez menos a los pacientes UCI en el sistema público. Esto ocurre dado que admitir a un paciente UCI en algún hospital público es tan caro que estas decisiones son las que más importan, haciendo más insignificantes las decisiones de admisión y transferencia de pacientes UTI a medida que el costo relativo de atender pacientes UCI aumenta. La Figura 5.10 ilustra este comportamiento. Por un lado, la Figura 5.10a muestra que, efectivamente, el valor del coeficiente asociado a admitir o transferir un paciente UCI es cada vez más alto a medida que aumenta el costo inmediato, comenzando con valores que indican proactividad (i.e., valores menores a 1000), y terminando con valores más altos incluso que derivar al privado. Por otro lado, la Figura 5.10b muestra un ejemplo de lo que ocurre con los valores de los coeficientes de admisión y transferencia para pacientes UTI. En este caso, el valor del coeficiente asociado a la decisión de admitir o transferir a pacientes UTI que han llegado al hospital $h = 3$ del grupo $g = 2$ se acerca cada vez más al valor del costo inmediato a medida que el costo de atención relativo aumenta.

Lo anterior se explica por la derivación de pacientes UCI al sistema privado. A medida que el costo de atender a un paciente UCI se acerca al valor de derivación a un recinto



(a) Valores de $Z_{h,g,UCI,i,UCI}$ ante cambios en el costo de atención de pacientes UCI en hospitales públicos (sin considerar ambulancia).



(b) Valores de $Z_{h,g,UTI,i,j}$ ante cambios en el costo de atención de pacientes UCI en hospitales públicos (sin considerar ambulancia).

Figura 5.10. como resultado al modificar el costo adicional de atención de pacientes UCI (sin considerar ambulancia) por sobre el costo de atención de pacientes UTI, para valores entre 0 y 10 000. Notar que esta diferencia relativa en el caso base es de 1 000.

privado, el costo de atención en público y de derivación a privado son cada vez más similares. Si este costo llega a los 9 400 (costo de atención en privado), la política es indiferente, en términos de costo esperado, entre admitir pacientes UCI en el hospital de llegada o enviarlos a privado. Si es más allá de 9 400, el sistema preferirá enviarlos siempre a un recinto privado, al ser esto más barato. Por último, una vez que se comienza a derivar a todos los pacientes UCI a un privado, el sistema queda con toda la capacidad UTI y UCI para los pacientes UTI, por lo que las transferencias a nivel de UTI se quedan sin orden de preferencia de destino, pero siempre intentando admitir al paciente en el hospital de llegada.

Análisis de fracción de camas que corresponden a UTI

Este análisis surge del hecho de que en este problema contamos con más de un tipo de camas. En esa línea, la pregunta que surge es ¿cómo se comportan las políticas resultantes a medida que las camas UTI son minoría o mayoría para atender pacientes críticos? Para

simplificar el análisis, se realizaron modificaciones a la proporción de camas que corresponden a camas UTI de dos hospitales: para el hospital $h = 1$, con el fin de ver si surgen proactividades para este hospital ya que, en el caso base, no se presentan; y para el hospital $h = 3$, con el fin de ver cómo se comportan los movimientos proactivos dependiendo de esta proporción. El análisis que se presentará a continuación considera sólamente a un grupo de diagnóstico que llegan a un solo hospital. Esta simplificación se debe a la cantidad de combinaciones de análisis posibles y dado que este caso ya ilustra la conclusión importante de este análisis.

La Tabla 5.17 muestra el orden de preferencia de transferencia/ocupación al ir variando la proporción de camas para el hospital $h = 1$, mientras que la Tabla 5.18 muestra el orden de preferencia de transferencia/ocupación al ir variando la proporción de camas para el hospital $h = 3$. Ambas tablas presentan la transferencia/ocupación de camas por parte de pacientes del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$, de modo de analizar cómo va variando dicho orden de preferencia.

- Para el caso de la Tabla 5.17 se aprecia que siempre es preferible admitir a pacientes UTI del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$ en su cama correspondiente independiente de la cantidad de camas UTI que tenga el hospital $i = 1$. Sin embargo, el orden de preferencia de uso de camas UCI es diferente si el hospital $i = 1$ tiene muchas más camas ($i = 3$ para UCI baja a orden 5 desde orden 3 para el caso base). Esto tiene explicación en el hecho de que el hospital $i = 1$ tiene muchas camas UTI para los valores de más arriba en la tabla, lo que hace que sea preferible ocupar dichas camas aunque haya costo de transferencia.
  A medida que disminuye la cantidad de camas UTI en el hospital $h = 1$, se aprecia también más de un cambio en el órden de preferencia, dado que, como hay menos camas UTI en el sistema completo, la política le asigna más valor al tiempo de estadía de los pacientes, en que los hospitales $i = 3$ e $i = 4$ tienen la mayor especialización.
  El valor que refleja estos casos se encuentra destacado en rojo.

Tabla 5.17. Orden de preferencia para la transferencia/ocupación de camas de pacientes UTI del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$, a medida que la cantidad de camas UTI del hospital $h = 1$ varía, manteniendo la cantidad de camas totales fija. En negrita se destacan los valores para el caso base, y los bloques negros son situaciones infactibles.

% camas UCI	Camas UCI	Camas UTI	UCI				UTI			
			$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
0 %	0	18		7	5	6	2	4	1	2
6 %	1	17	8	7	5	6	2	4	1	2
11 %	2	16	8	7	5	6	2	4	1	2
17 %	3	15	8	7	5	6	3	4	1	2
22 %	4	14	8	7	3	6	4	5	1	2
28 %	5	13	8	7	3	6	4	5	1	2
33 %	6	12	8	7	3	6	4	5	1	2
39 %	7	11	7	8	3	6	4	5	1	2
44 %	**8**	**10**	7	8	3	6	4	5	1	2
50 %	9	9	7	8	3	6	4	5	1	2
56 %	10	8	6	8	2	4	6	5	1	3
61 %	11	7	6	8	2	4	6	5	1	3
67 %	12	6	6	8	2	4	6	5	1	3
72 %	13	5	6	8	2	4	6	5	1	3
78 %	14	4	6	8	2	4	6	5	1	3
83 %	15	3	6	8	2	4	6	5	1	3
89 %	16	2	6	8	2	4	6	5	1	3
94 %	17	1	6	8	2	4	6	5	1	3
100 %	18	0	6	7	2	4		5	1	3

- Dado que las tasas de entrada y tiempos de estadía no cambian, en la Tabla 5.18 se sigue apreciando que lo más preferible es admitir a pacientes UTI del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$ en camas UTI del mismo hospital. Sin embargo, el orden de preferencia de transferencia/ocupación es distinto al mostrado en la Tabla 5.17 dado que acá se está modificando directamente la proporción de camas UTI del hospital en cuestión ($h = 3$). En particular, cuando hay muy pocas camas UCI (este hospital es el que más rápido resuelve a pacientes de este grupo), la política sugiere que pacientes UTI ocupen camas UCI recién cuando un 33 % de camas del hospital son UCI.

Tabla 5.18. Orden de preferencia para la transferencia/ocupación de camas de pacientes UTI del grupo $g = 2$ que llegan al hospital $h = 3$, a medida que la cantidad de camas UTI del hospital $h = 3$ varía, manteniendo la cantidad de camas totales fija. En negrita se destacan los valores para el caso base, y los bloques negros son situaciones infactibles.

% camas UCI	Camas UCI	Camas UTI	UCI				UTI			
			$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
0 %	0	27	7	6	■	5	3	4	1	2
4 %	1	26	8	7	5	6	3	4	1	2
7 %	2	25	8	7	5	6	3	4	1	2
11 %	3	24	8	7	5	6	3	4	1	2
15 %	4	23	8	7	5	6	3	4	1	2
19 %	5	22	8	7	5	6	3	4	1	2
22 %	6	21	8	7	5	6	3	4	1	2
26 %	7	20	7	8	5	6	3	4	1	2
33 %	9	18	7	8	3	6	4	5	1	2
37 %	10	17	7	8	3	6	4	5	1	2
41 %	11	16	7	8	3	6	4	5	1	2
44 %	**12**	**15**	7	8	3	6	4	5	1	2
48 %	13	14	7	8	3	6	4	5	1	2
52 %	14	13	7	8	2	4	5	6	1	3
56 %	15	12	7	8	1	4	5	6	1	3
59 %	16	11	7	8	1	4	5	6	1	3
63 %	17	10	7	8	1	4	5	6	1	3
67 %	18	9	7	8	1	4	5	6	1	3
74 %	20	7	7	8	1	4	5	6	1	3
81 %	22	5	7	8	1	4	5	6	1	3
85 %	23	4	7	8	1	4	5	6	1	3
89 %	24	3	7	8	1	4	5	6	1	3
93 %	25	2	7	8	1	4	5	6	1	3
96 %	26	1	7	8	1	4	5	6	1	3
100 %	27	0	6	7	1	3	4	5	■	2

También es importante mencionar que cuando cerca de un 56 % de las camas son UCI, la política comienza a ser indiferente con respecto al tipo de cama del hospital $i = 3$ a asignar a los pacientes que llegan al hospital $h = 3$ (dada la cantidad de camas), al ser ambos primera prioridad de ocupación.

Nuevamente, estos descubrimientos se encuentran destacados en rojo en la tabla.

Estos casos fueron los presentados dado que permiten ilustrar una conclusión importante de este análisis: las políticas obtenidas con esta metodología consideran inteligentemente la cantidad de camas tanto del hospital modificado como del sistema completo, haciendo transferencias que equilibran el efecto futuro de las decisiones de forma inteligente. En particular, en caso que sea necesario, la AOP es capaz de redefinir el orden de preferencia de transferencia/ocupación de pacientes, y de detectar si es realmente beneficioso (en términos de costo) hacer que pacientes UTI ocupen camas UCI dependiendo de la cantidad de camas que haya.

Análisis de la tasa de ocupación global del sistema

Se realizó también un análisis de cómo se ve afectada la política de admisión, transferencia y derivación de pacientes a medida que se cambia la tasa de ocupación global del sistema. Es decir, se estudiaron cambios que afectan tasas de entradas, tasas de salida y/o capacidad global, que finalmente afectan a la tasa de ocupación implícita de los hospitales.

Las conclusiones de este análisis son las mismas que las presentadas en la sección 5.1.3.2 (página 57). Nuevamente, si se incrementa la tasa de entrada comenzando desde valores muy bajos (y, por lo tanto, saturando el sistema), las conclusiones son:

- Para valores de tasas de entrada muy bajos (y, por ende, niveles de ocupación bajos), las políticas encontradas no le dan valor al futuro. Como resultado, no se obtienen transferencias y/o derivaciones proactivas, sino que todas consideran solamente el costo inmediato y, por lo tanto, proceden de manera reactiva.
- A medida que va aumentando la tasa de entrada (y, por ende, los niveles de ocupación), surge un orden de preferencia de transferencia, lo que indica que el costo futuro comienza a tomar valor.
- Existe un valor para las tasas de entradas a partir del cual la ocupación comienza a ser relevante a un nivel tal que comienzan a haber transferencias proactivas de pacientes UCI, al ser los más caros de atender en el sector privado. Recordar que ocurrió algo similar para el análisis de 5.1.3.2 (página 57).

- Existe un valor aún mayor para las tasas de entradas a partir del cual comienzan las transferencias de pacientes UTI. Es relevante notar que estas transferencias ocurren después, dado que el costo de atender a un paciente UTI en el privado es de menor valor.

Otro aspecto interesante de notar es el hecho de que esta transición recién indicada ocurre tanto si se modifican las tasas de entrada de pacientes UCI como de pacientes UTI. Sin embargo, el valor al que surgen movimientos proactivos es menor para tasas de entrada de pacientes UCI que para pacientes UTI. Es decir, la política es más sensible al nivel de ocupación de pacientes UCI que de pacientes UTI. Esto también se debe a que pacientes de mayor complejidad tienen un mayor costo de derivación que los de menor complejidad, lo que hace que las políticas obtenidas se preparen de mejor forma para evitar derivaciones reactivas de pacientes UCI.

Finalmente, el modelo tenderá a priorizar transferencias dependiendo del nivel de especialización y ocupación promedio de los hospitales y de las unidades de cada hospital.

Análisis de fracción de camas que corresponden a UTI

A modo de resumen, se enlistan los principales descubrimientos asociados a esta instancia que considera a pacientes de UTI y de UCI:

- Trae conclusiones bastante similares al caso que considera solamente la red de UCIs.
- La proactividad en la transferencia de pacientes UTI también depende del costo de transferencia.
- Si el costo de atención UCI en el privado es muy bajo, se tenderá a derivar a pacientes UCI. Esto desocupará el sistema y hará que sea conveniente que pacientes UTI ocupen camas UCI antes de derivar al privado.
- Si el costo de atención UCI en el privado es muy alto, es menos preferible que pacientes UTI de estadía larga ocupen camas UCI que pacientes UTI de estadía

corta. Puede ocurrir también un fenómeno de conveniencia en derivar pacientes UTI al privado.

- A medida que el costo de derivar a pacientes UTI al sector privado aumenta, el costo inmediato y futuro esperado descontado de asignar pacientes UTI a camas UCI es cada vez menor. Esto indica que cada vez es más preferible que pacientes UTI ocupen camas UCI.
- La diferencia entre costos de resolución UCI vs UTI en el público también influye en la política obtenida. Mientras mayor sea la brecha, más conveniente será derivar a los pacientes UCI.
- La proporción de camas UTI vs UCI también influye en la política. Mientras más proporción de camas UCI hay, más conveniente es que pacientes UTI ocupen camas UCI antes de ser derivados al privado. El orden de preferencia también se ve alterado por este indicador.
- El equilibrio entre tasas de entrada y tiempos de estadía también influye en las políticas. Lo más sensible a la proactividad es la transferencia de pacientes UCI hacia hospitales con mayor efectividad resolutiva.

6. DESEMPEÑO DE LA METODOLOGÍA Y DISEÑO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

En este capítulo se utilizará la metodología propuesta en situaciones reales, con tres objetivos en mente. El primero es estudiar una instancia de tamaño real con el fin de determinar el desempeño operacional de la solución propuesta en base a diversos estadísticos. Se generarán y evaluarán las políticas públicas asociadas a redes de UCIs para el caso chileno, junto con mostrar los beneficios potenciales que esta trae consigo. A su vez, una de las políticas a presentar responderá a la pregunta de la conveniencia o no de la existencia de movimientos proactivos entre Servicios de Salud.

El segundo objetivo es darle un uso alternativo a esta herramienta. Para ello, se presentarán las heurísticas generadas que utilicen el enfoque para determinar un plan de expansión de la capacidad de una red de hospitales, permitiendo obtener el valor de una cama adicional. De esta forma, se presentarán otros usos y beneficios de esta metodología.

El tercer objetivo es estudiar el desempeño computacional de esta metodología. Se presentarán todos los tiempos de resolución para cada estudio, y además se presentará un estudio sobre el desempeño ante distintos tamaños de instancias reales.

A modo de resumen, en este capítulo se ilustrarán los resultados que permiten responder a las siguientes preguntas: ¿Cómo es el desempeño operacional de una AOP por sobre una política miope en una situación real? ¿Cómo son los tiempos de ejecución de la metodología propuesta ante diversos escenarios del mundo real? ¿Permite la proactividad de movimientos entre SSs generar beneficios económicos? ¿Cuál es el valor de una cama adicional? ¿En qué conviene más tener una cama adicional? ¿Se puede obtener una política de movimientos junto a una política de expansión de capacidad?

6.1. Desempeño del enfoque propuesto para el diseño de políticas públicas para la red de UCIs

6.1.1. Políticas de transferencias interhospitalarias de pacientes UCI

6.1.1.1. Desempeño del enfoque propuesto ante un caso real

A continuación se evaluarán los beneficios potenciales asociados al uso del enfoque de solución propuesto, al aplicarlo a una instancia del problema basada en un caso real. Se comparará el desempeño de las políticas AOP y miope definidas en 5.1.3.1 (página 48). Los costos de atención y capacidades de los hospitales fueron ajustados a partir de los correspondientes a las Unidades de Cuidado Intensivo Adulto de tres hospitales del Servicio de Salud Metropolitano Sur (SSMS): el Hospital Barros Luco (BL), el Hospital El Pino (EP) y el Hospital Parroquial San Bernardo (SB). Los costos de ambulancia fueron considerados proporcionales a la distancia recorrida en cada movimiento, mientras que los costos de atención en el privado fueron ajustados a partir del promedio nacional según los pesos de los costos de cada Categorías Diagnósticas Mayores (MDC, de sus siglas en inglés) presentados por el American Federal Register (1983). Nuevamente, se consideró que las decisiones se toman de forma diaria.

Se utilizaron 20 grupos de diagnóstico, basados en las MDC definidas por la Universidad de Yale, que agrupan diagnósticos en base al sistema del cuerpo y etiología de la enfermedad (Yale University School of Public Health, 1981). En la Tabla 6.1 se identifican los 20 grupos utilizados.

Por otro lado, las tasas de llegada y los tiempos de estadía promedio fueron adaptados a la realidad chilena a partir de datos agregados de un sistema de hospitales canadiense. Se asumió que el número de llegadas diarias sigue un proceso Poisson, mientras que los tiempos de servicio siguen una distribución geométrica. Las tasas de entrada y los tiempos de estadía utilizados se encuentran detallados en las Tablas 6.2 y 6.3. Un resumen de estas

ID	Nombre
g01	Enfermedades y trastornos del sistema nervioso
g02	Enfermedades y trastornos del ojo
g03	Enfermedades y trastornos del oído, nariz, boca y garganta
g04	Enfermedades y trastornos del sistema respiratorio
g05	Enfermedades y trastornos del sistema circulatorio
g06	Enfermedades y trastornos del sistema digestivo
g07	Enfermedades y trastornos del sistema hepatobiliar y páncreas
g08	Enfermedades y trastornos del sistema musculoesquelético y tejido conectivo
g09	Enfermedades y trastornos de la piel, del tejido subcutáneo y de la mama
g10	Enfermedades y trastornos endocrinos, nutricionales y metabólicos
g11	Enfermedades y trastornos del riñón, vías urinarias y sistema reproductor masculino
g12	Enfermedades y trastornos del sistema reproductor femenino
g13	Embarazo, parto y puerperio
g14	Enfermedades y trastornos de la sangre, del sistema hematopoyético y del sistema inmunitario
g15	Enfermedades infecciosas y parasitarias (sistémicas o afectación no especificada)
g16	Enfermedades o trastornos mentales
g17	Heridas, envenenamientos y efectos tóxicos de las drogas
g18	Quemaduras
g19	Categorías misceláneas y data sin grupo
g20	Otras razones de hospitalización

Tabla 6.1. Grupos de diagnósticos utilizados para el caso basado en la realidad, conocidos como Categorías Diagnósticas Mayores.

tablas y de la información de capacidades de los hospitales se encuentra disponible en la Tabla 6.4.

Tabla 6.2. Tasas de llegada, en pacientes/día, utilizados para el caso basado en la realidad (λ_{hg}).

		Grupos Relacionados de Diagnóstico																			
		g01	g02	g03	g04	g05	g06	g07	g08	g09	g10	g11	g12	g13	g14	g15	g16	g17	g18	g19	g20
Hosp.	BL	0,20		0,16	0,24	10,46	0,20	0,21	0,17	0,13	0,21	0,20		0,18	0,20	0,18	0,22	0,28			0,17
	EP	0,10	0,06	0,07	0,28	0,40	0,15	0,09	0,07	0,06	0,08	0,10	0,07	0,07	0,10	0,21	0,06	0,14	0,07		0,08
	SB	0,19	0,03	0,03	0,08	0,15	0,07	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,07	0,04	0,16	0,03	0,03	0,04

Tabla 6.3. Largos de estadía promedio, en cantidad de días, utilizados para el caso basado en la realidad, asociados con ρ_{hgl}.

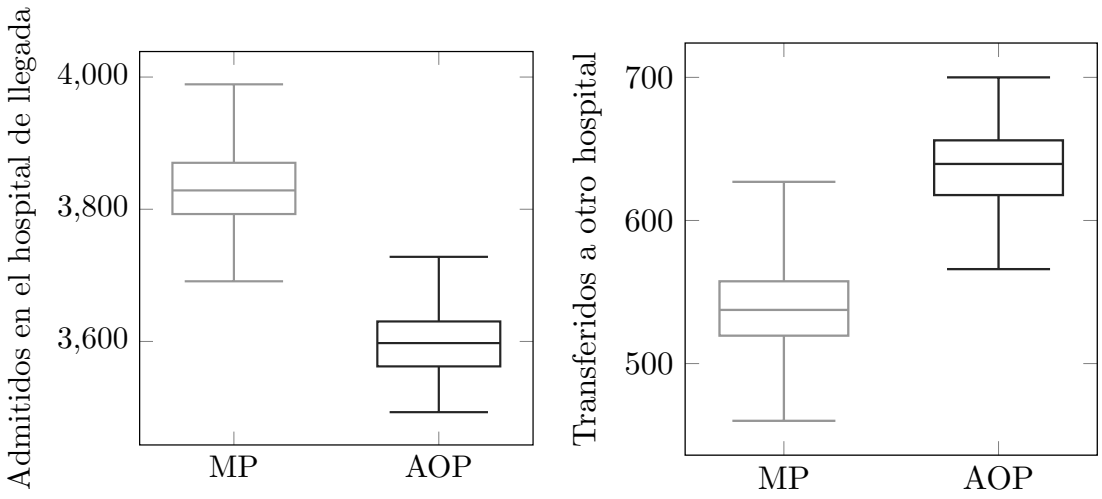
		Grupos Relacionados de Diagnóstico																			
		g01	g02	g03	g04	g05	g06	g07	g08	g09	g10	g11	g12	g13	g14	g15	g16	g17	g18	g19	g20
Hosp.	BL	7,73		12,22	8,75	2,36	3,04	1,44	1,10	3,36	1,65	4,34		2,91	2,08	4,63	1,17	3,04			1,11
	EP	6,97	4,90	4,87	8,10	4,12	6,23	6,70	5,76	5,77	4,16	5,22	3,45	2,71	7,67	7,82	5,12	5,37	3,16		5,20
	SB	6,26	1,09	3,84	9,81	4,48	5,23	5,48	4,72	5,26	3,62	4,56	8,51	2,34	7,20	7,48	4,77	6,49	4,91	0,74	3,78

Tabla 6.4. Resumen de datos utilizados para la aplicación al sistema de UCIs chileno.

		Tasa de entrada promedio	Tiempo de estadía promedio	Capacidad	Utilización implícita
Hosp.	BL	13,41 pac/día	3,81 días	31 camas	116,41 %
	EP	2,26 pac/día	5,44 días	12 camas	107,59 %
	SB	1,26 pac/día	5,03 días	6 camas	115,60 %
Global		16,92 pac/día	3,84 días	49 camas	114,15 %

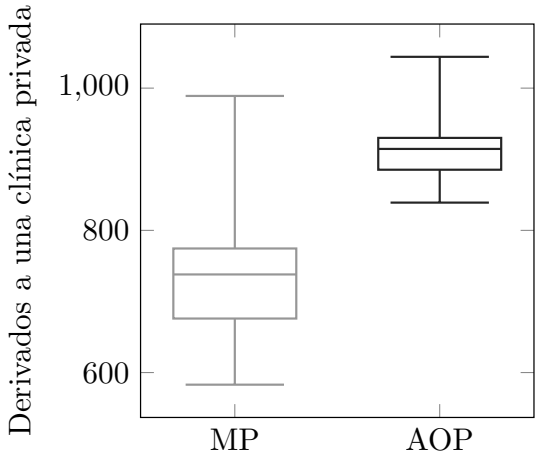
Se realizaron 100 réplicas de dos años, en que los estadísticos fueron recolectados luego de un período transiente de un año. El algoritmo tardó cerca de 15 minutos en determinar el valor de los coeficientes que definen la AOP. Por otro lado, el modelo de simulación tardó un poco más de 12 minutos en evaluar las medidas de desempeño de la Figura 6.1 para las políticas AOP y Miope.

La Figura 6.1 ilustra las cuatro métricas de desempeño que se obtuvieron y compararon, agregadas para los tres hospitales, tanto para la AOP como la política miope. Las métricas escogidas fueron: cantidad total de pacientes internados en el hospital al que llegaron, cantidad total de transferencias interhospitalarias, cantidad total de derivaciones a clínicas privadas y costo descontado total. En la figura se puede apreciar que la AOP interna menos pacientes en el hospital al que llegan y, por lo tanto, transfiere y deriva más pacientes a otros hospitales. Esto ocurre como consecuencia de las decisiones de transferir y derivar a algunos grupos de pacientes de forma proactiva. Sin embargo, esto se considera razonable si se tiene en cuenta que se logra un ahorro mensual global promedio cercano al 48,7 % del gasto estatal (casi 425 mil dólares ahorrados mensualmente). Todas estas diferencias son estadísticamente significativas (valor-$p < 0{,}0001$). Este ahorro se explica porque la AOP, para descongestionar el sistema y manejar la variabilidad de mejor manera, mueve proactivamente al privado a aquellos pacientes cuyos diagnósticos son los más baratos, como se puede apreciar en la Figura 6.2. De esta forma, permite que el sistema público se encargue de aquellos grupos de pacientes cuya derivación reactiva al privado es más costosa.

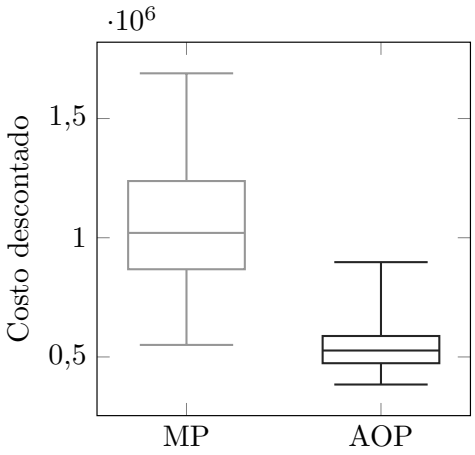


(a) Cantidad de pacientes internados en el hospital al que llegan.

(b) Cantidad de pacientes transferidos interhospitalariamente.



(c) Cantidad de pacientes derivados al sector privado.



(d) Costo total descontado.

Figura 6.1. Comparativa del desempeño de la AOP y la política miope (MP) de acuerdo a las diferentes medidas de desempeño consideradas. Los diagramas de caja ilustran el máximo, mínimo y los cuartiles.

Además, como se puede apreciar en la Tabla 6.5, la AOP genera una menor ocupación en los hospitales, y una menor ocupación empírica global, permitiéndole al sistema ser más hábil en lidiar con la variabilidad de la demanda. El hecho de que la ocupación global lograda por la política sea sólo de un 79,92 % indica que, de las 24 horas al día, una cama

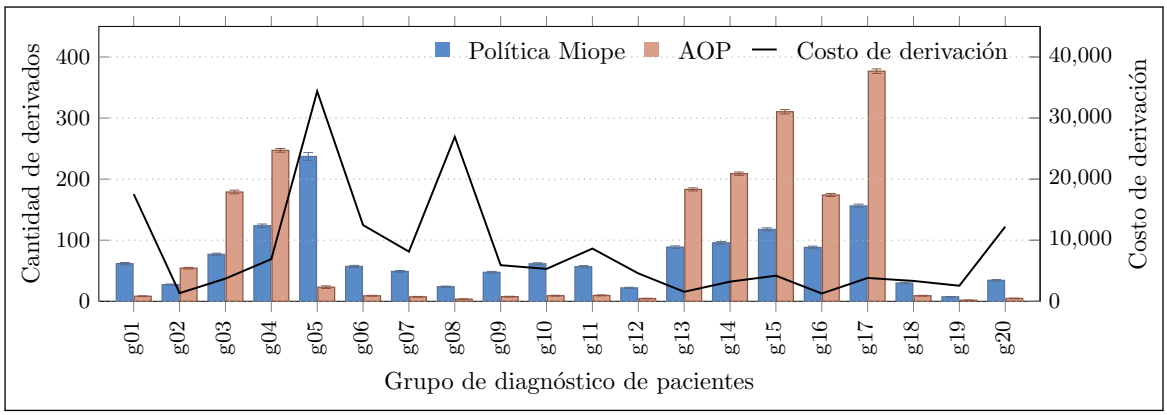


Figura 6.2. Comparación en la cantidad de pacientes derivados al sector privado entre las políticas miope y AOP. El margen de error fue calculado con un nivel de confianza del 95 %. Fuente: Elaboración propia

crítica promedio está desocupada, en promedio, un poco menos de 5. Esta disminución en la ocupación se debe a que la AOP determina cuáles grupos de pacientes son los que conviene atender en clínicas privadas y cuáles en el sector privado.

Tabla 6.5. Tasas de ocupación efectiva empírica obtenidas por la AOP y la política actual (Miope), al simular el sistema para la aplicación práctica chilena.

	Miope	AOP
Ocupación BL	95,67 %	85,01 %
Ocupación EP	95,46 %	69,38 %
Ocupación SB	94,10 %	74,70 %
Ocupación global	95,42 %	79,92 %

6.1.1.2. Política resultante para el SSMS

Dado el desempeño satisfactorio de la política propuesta (AOP), en esta sección se describe un instructivo a seguir por el tomador de decisiones (UGCC) de la red de hospitales. Esta permitirá saber cómo proceder ante un nuevo requerimiento de cama crítica UCI que surja en la red, dependiendo del grupo de paciente del que se trate.

Muchos protocolos actuales tienen como primer paso verificar si el hospital al cual llega el paciente dispone de camas críticas para recibirlo, para que, en caso de que no tenga, decidir transferirlo o derivarlo. Es decir, son protocolos reactivos. Esta tesis propone cambiar esa parte del protocolo por políticas proactivas. Es decir, que ya no sea necesario esperar a que un hospital no disponga de camas para decidir si un paciente debe ser transferido o derivado. Es de suma importancia adaptar los protocolos de derivación y traslado de pacientes existentes en el país, dentro y entre las redes de salud pública, para poder lograr un ahorro significativo en el gasto estatal.

Debido a la extensión del instructivo, se decidió ubicarlo en el Anexo E. Ahí, se encuentra la serie de pasos que se debe seguir, según la AOP, ante la llegada de un nuevo requerimiento de cama crítica UCI en el SSMS. Recordemos que este requerimiento surge cuando el médico tratante y el equipo del hospital logran estabilizar al paciente y este se encuentra transferible, lo cual define la necesidad de hospitalización del paciente en una cama crítica.

Las decisiones de transferencia y derivación, como ya ha sido mencionado, dependen de las tasas de entrada, tiempos de estadía promedio y tasas de ocupación promedio de cada uno de los hospitales. Por lo mismo, permiten maximizar el uso de la especialización de los hospitales de la red. Esto muestra la importancia de que existan hospitales especializados en ciertas categorías de diagnóstico, para poder entregar mejor nivel de salud y lograr menores tiempos de estadía. De esta manera, es altamente beneficioso que la red dedique más recursos a especializar algunos hospitales en categorías específicas basadas en las reglas de decisión presentadas anteriormente.

Por último, es importante destacar que este instructivo se basa en los datos con los que se cuenta, los cuales en muchos casos son aproximados o adaptados para representar el sistema chileno. Por lo mismo, es fundamental contar con un registro de la demanda real por servicio, independiente de dónde sea atendido finalmente el paciente, y el tiempo de estadía exacto de cada paciente en cada hospital. Además, es muy importante realizar un estudio acabado que permita identificar el costo promedio de atención de cada grupo de

diagnóstico en cada uno de los hospitales (incluyendo clínicas privadas), pues estudios en la literatura han mostrado que pueden ser distintos de hospital en hospital (Alvear et al., 2013a). Por lo mismo, para generar una política y un manual instructivo más ajustados a la realidad del SSMS, se sugiere contar con la siguiente información:

- Cantidad de pacientes críticos y transferibles que surgen cada día, por categoría, en cada hospital.
- Tiempo de estada promedio (o bien distribución del tiempo de estada) de cada categoría, por hospital.
- Cuánto cuesta exactamente atender, en promedio, a los pacientes de cada categoría en cada hospital.
- Cuánto cuesta exactamente el movimiento de pacientes entre hospitales y hacia privados.
- Cuánto cuesta, en promedio para cada categoría, la resolución de los pacientes de cada categoría en cada uno de los servicios privados a los que se puede derivar.
- Además, si bien no es para determinar una política más ajustada a la realidad, es necesario contar con el costo de instalar una cama crítica UCI adicional en el sistema, por hospital, para lograr el propósito final que se discutirá en la Sección 6.1.2 más abajo.

6.1.1.3. Nivel de ocupación de activación de la política

Es importante considerar que la política óptima aproximada resultante fue generada a partir de los datos obtenidos, que consideran promedios de 2 años para un conjunto de hospitales. Por lo mismo, es una política estacionaria que debería regir para todo el año. En otras palabras, no seguirla cuando el sistema tenga capacidad de sobra en un instante particular podría resultar en un desempeño promedio mucho peor.

A su vez, esta metodología genera sugerencias de transferencia y/o derivación proactivas dependiendo del nivel de oferta y demanda promedio del servicio y de cada hospital.

La Tabla 6.6 fue construida haciendo menor la demanda por los servicios de forma transversal a hospitales y grupos de diagnóstico, para ilustrar que la necesidad de movimientos proactivos va disminuyendo a medida que la utilización implícita (la medida para determinar qué tan sobredemandado se encuentra el sistema) va disminuyendo.

Tabla 6.6. Existencia de proactividad para distintas ocupaciones generadas por cambios en la tasa de entrada. Los números en paréntesis en la última fila indican la cantidad de coeficientes de transferencia y de derivación que fueron proactivos, respectivamente.

Factor multiplicando las tasas de entrada	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Utilización implícita	74,20 %	79,90 %	85,61 %	91,32 %	97,03 %	102,73 %	108,44 %	114,15 %
Ocupación simulada MP	74,02 %	79,35 %	82,01 %	87,01 %	90,20 %	92,18 %	94,21 %	95,47 %
Ocupación simulada AOP	74,02 %	79,34 %	83,53 %	82,75 %	82,12 %	82,26 %	80,94 %	79,77 %
¿Proactividad en política? (#)	No	No	Sí (2+0)	Sí (17+0)	Sí (47+12)	Sí (49+17)	Sí (50+23)	Sí (51+24)

La principal conclusión de este análisis es que, una vez más, la proactividad no siempre es útil. Por ejemplo, la tabla ilustra que recién a niveles mayores a un 75 % de la demanda actual promedio (y por ende, una utilización implícita mayor a 86 %) es sugerible realizar derivaciones proactivas. El análisis recién planteado respalda lo indicado a lo largo del documento doctoral. Así, la metodología presentada en esta tesis también permite determinar cuándo *no* es necesario transferir proactivamente, lo que permite asegurar que el proceder es correcto económicamente hablando. Por último, es interesante también notar que la AOP busca mantener la ocupación cerca de un 80 % para poder lidiar de mejor manera con la variabilidad del sistema.

Por otro lado, a pesar de que la política es estacionaria y debería regir para todo el tiempo, es de conocimiento general que la demanda por servicios médicos en los hospitales suele seguir una estacionalidad clara: por ejemplo, en invierno los centros de salud se ven más saturados dada una alta demanda por atención. Es por esto mismo que, luego de conversaciones con especialistas en el área, se sugiere al tomador de decisiones adoptar cuatro políticas a seguir, una para cada estación del año. Lamentablemente, como no se pudo contar con información sobre la demanda y los tiempos de estadía promedio separados por mes, no fue posible generar una política distinta para cada estación del año. Por

lo mismo, la sugerencia es regirse por la política indicada en el instructivo de la sección 6.1.1.2 independiente de la estación pues, en promedio, genera un mejor desempeño.

De todas formas, se indica, para futuros trabajos, que es necesaria una cuidadosa obtención de las tasas de entrada por hospital, por grupo, promediados por mes; y de los promedios mensuales de tiempos de estadía (o mejor aún, distribución de tiempos de estadía) que esté dividida por hospital y por grupo de pacientes. Una vez que se cuente con esta información, basta con ejecutar nuevamente la metodología propuesta en esta tesis para obtener las políticas a buscar, cada una por cada estación del año.

6.1.2. Políticas de aumento de capacidad UCI

Existen planes de expansión de capacidad a lo largo de la red chilena. Para seguir el hilo de esta tesis, si bien la metodología es aplicable a cualquier red de hospitales (en particular para la red de un servicio de salud o la red de una región completa), se decidió determinar políticas de aumento de capacidad para el caso real del Servicio de Salud Metropolitano Sur, estudiado en la Subsección 6.1.1.

Se utilizó el enfoque de solución diseñado en esta tesis para determinar el valor de una cama adicional, y la ubicación ideal de una o más camas adicionales. La metodología a presentar permitirá determinar una distribución ideal de nuevas camas críticas entre hospitales, considerando las tasas de entrada y tiempos de estadía promedio de cada hospital de la red.

El problema de ampliación de capacidad no es para nada trivial. Como se destaca en Obregón (2012), aumentar el número de camas necesarias también incluirá el aumento del en el personal especialista necesario para operarlas. Sin embargo, en esta sección se presentará la forma de utilizar la metodología asumiendo que existe la posibilidad de conseguir los especialistas y el espacio físico necesarios.

6.1.2.1. Valor de una cama adicional

A continuación se busca determinar el valor de una cama adicional. Para ello, se considera la capacidad ya existente en cada hospital de la red, que es conocida y limitada. Es decir, dada la capacidad actual de la red, es clara la ausencia de camas en el sistema hospitalario, lo cual es visible en la Tabla 6.4. En esa tabla, es posible ver que los tres hospitales tienen una utilización implícita superior al 100 %, lo que indica que todos los hospitales observan mayor demanda de la que pueden atender en promedio. Así, en primera instancia, se busca determinar el valor que tiene una sola cama adicional en esta red de salud.

Para determinar el valor de una cama adicional, se consideró cuatro escenarios distintos en que, para cada escenario $e \in \{0, 1, 2, 3\}$, el indicador de la cantidad de camas existentes en cada hospital $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^H$ se encuentra sumado a un vector canónico $\mathbf{e}_e \in \mathbb{R}^H$. Un abuso de notación permite considerar a $\mathbf{e}_0$ como el vector nulo. De esta forma, la nueva cantidad de camas UCI disponibles para cada escenario e corresponde a

$$\mathbf{K}'_e = \mathbf{K} + \mathbf{e}_e, \qquad \forall e \in \{0, 1, 2, 3\}.$$

El resto de los parámetros para los cuatro escenarios son los mismos que los presentados en las Tablas 6.2 y 6.3.

Para cada escenario de nueva cantidad de camas, se determinaron los valores óptimos de los coeficientes de la metodología, los que permitieron construir un set de cuatro políticas óptimas aproximadas (en que la política para $e = 0$ coincide con la simulada en la subsección 6.1.1). Las cuatro AOPs fueron simuladas bajo las mismas características. Los resultados de este análisis se pueden apreciar en la Tabla 6.7.

De la tabla se puede desprender que el costo descontado futuro para cada uno de los escenarios en los que un hospital cuenta con una cama adicional presenta un valor menor que aquel para el escenario en que no se le agrega ninguna cama. Esto permite determinar cuál es el valor de una cama adicional en cada uno de los hospitales. Por ejemplo, agregar

Tabla 6.7. Comparación de los costos descontados esperados futuros asociados al caso actual y al caso en que cada uno de los tres hospitales de la red cuenta con una cama crítica más, obtenidos siguiendo una AOP. El margen de error es el correspondiente a un nivel de confianza del 95 %.

	e	Costo descontado	Ganancia
Situación actual	0	560 915.8 ± 10 991.3	–
BL con 1 cama más	1	493 103.4 ± 11 575.8	67 812.3 ± 4 803.6
EP con 1 cama más	2	503 011.6 ± 24 148.5	57 904.2 ± 5 333.2
SB con 1 cama más	3	505 294.0 ± 23 876.9	55 612.8 ± 6 489.0

una adicional en el hospital BL, generará una reducción del gasto descontado esperado de 67 812.

Por otro lado, también se puede apreciar que el valor de una cama adicional no es el mismo para todos los hospitales. Esto tiene mucha relación con la especialización de los hospitales. Si un hospital tiene una mayor eficiencia resolutiva para los grupos de alta demanda, las políticas tenderán a enviar a los pacientes a ese hospital. Si ese hospital hace más eficiente aún su capacidad resolutiva (i.e., reduce los tiempos de estadía promedio), entonces estará, en promedio, atendiendo a más pacientes en el tiempo, lo que permitiría aumentar la tasa de aceptación de pacientes y, por lo tanto, reducir la tasa de derivación de pacientes al privado (la opción más cara).

Por otro lado, aun si, por algún motivo, se desea no considerar los movimientos proactivos sugeridos por esta tesis, ni el beneficio de considerar el efecto que las decisiones de hoy tienen en el desempeño el futuro del sistema, el enfoque de solución presentado en este documento doctoral permite determinar el valor de una cama adicional bajo el proceder actual. Esto es posible mediante el uso de la política miope definida en 5.1.3.1 (página 48). La Tabla 6.8 muestra el resultado de simular los mismos cuatro escenarios, pero usando la política miope.

Incluso sin considerar la decisión de implementar políticas proactivas, este procedimiento permite ilustrar que sí se puede determinar el valor de agregar una cama adicional

Tabla 6.8. Comparación de los costos descontados asociados con el caso actual y el caso en que cada uno de los tres hospitales de la red cuenta con una cama crítica más, en miles de pesos, obtenidos usando a la política miope. El margen de error es el correspondiente a un nivel de confianza de 95 %.

	e	Costo descontado	Ganancia
Situación actual	0	1 068 336.0 ± 61 210.97	–
BL con 1 cama más	1	952 149.9 ± 58 952.5	116 186.3 ± 16 704.1
EP con 1 cama más	2	980 629.6 ± 59 080.5	87 706.4 ± 14 149.6
SB con 1 cama más	3	976 941.3 ± 59 278.4	91 394.8 ± 16 423.4

al sistema. En este caso, la mayor ganancia se genera en el hospital BL. Que exista mayor valor en un hospital u en otro sigue la misma explicación recién provista.

6.1.2.2. Determinación del tamaño del aumento

A continuación se propone cómo determinar un adecuado plan de acción para un determinado presupuesto para la expansión de camas. Para ello, se asume que la inversión se puede realizar solamente sobre un hospital. Es decir, se asume que el gasto que involucra la inversión estructural para aumentar la cantidad de camas críticas de cada uno de los hospitales es tal que hace posible su aumento solamente en uno de los hospitales en cuestión. Por ende, la pregunta detrás es a qué hospital agregarle una o más camas.

Así, utilizando los mismos parámetros para todos los escenarios realizados, se determinó los coeficientes que determinan la AOP para aumentos enteros de camas en cada uno de los hospitales por separado. Es decir, se obtuvo el valor de los coeficientes para los escenarios en que se aumenta una cierta cantidad de camas UCI solamente en uno de los tres hospitales, para luego simular las políticas resultantes con el fin de obtener el estadístico de costo descontado promedio. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 6.3, que ilustra el ahorro logrado para cada configuración de aumento de capacidadcon respecto al escenario del caso basado en la realidad presentado en la Subsección 6.1.1.

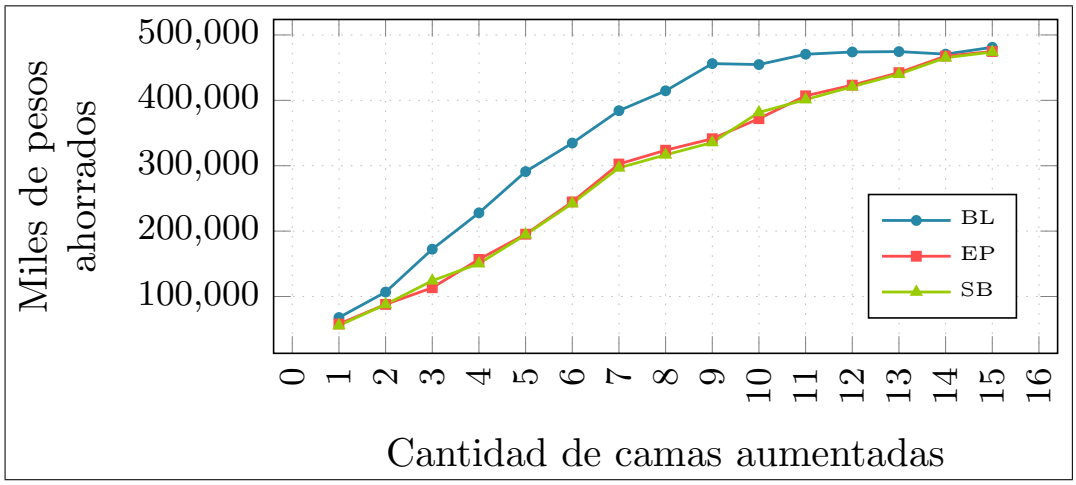


Figura 6.3. Aumento del ahorro a medida que aumenta la capacidad hospitalaria.

En la figura se puede apreciar que el ahorro de aumentar una cama adicional (sin considerar su costo) presenta economías de escala decrecientes. Es decir, el valor que presenta una cama adicional en cada hospital es menor a medida que se tiene más camas en él. A su vez, también se puede apreciar que el valor adicional es distinto para cada hospital, dada la distinta configuración de demanda y tiempos de estadía entre hospitales.

La Figura 6.4 ilustra los mismos resultados, solamente que ahora considerando un costo arbitrario de 30 millones de pesos, que considera la compra, instalación y uso descontado en el tiempo. Este valor es bastante menor que el real (Obregón, 2012), sin embargo, permite ilustrar que se puede usar la metodología propuesta, para además determinar dónde y cuántas camas ubicar. Cabe recordar que se asumió que todos los hospitales tienen espacio y las herramientas para hacer la expansión correspondiente.

6.1.2.3. Determinación de la distribución de las camas

Finalmente, es posible usar la metodología no solo para determinar la cantidad óptima de camas a agregar al sistema, si no que también para poder definir cómo distribuirlas en el caso de que no se desee poner todas las camas nuevas en el mismo hospital.

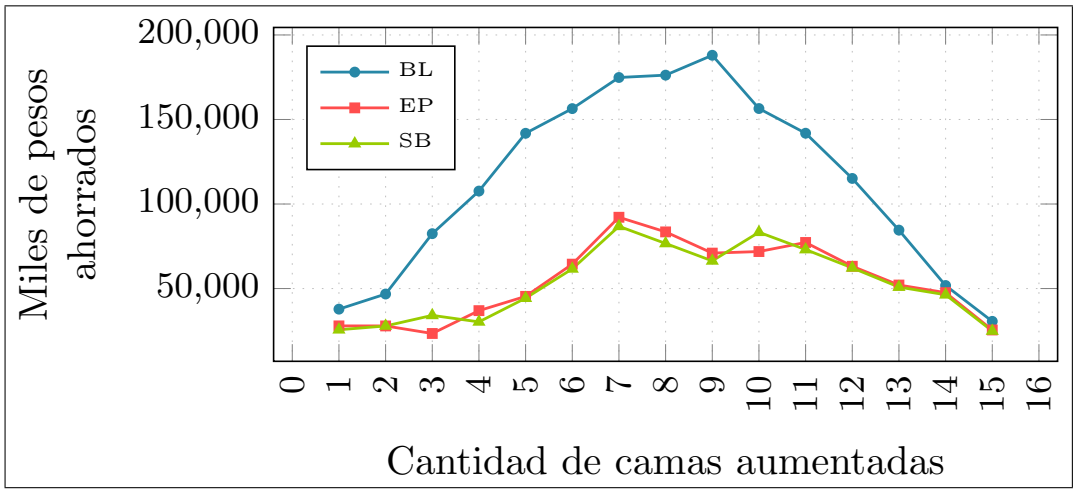


Figura 6.4. Aumento del ahorro a medida que aumenta la capacidad hospitalaria considerando el gasto por cama.

Para resolver este problema, se propone una heurística *greedy* que utiliza la metodología propuesta, que se presenta en Heurística 5. Si se quisiera agregar un máximo de 15 camas a este sistema de 3 hospitales, esta heurística permite evitar tener que resolver 15^3 problemas para determinar cuál es el valor agregado de agregar entre 0 y 15 camas al sistema. En cambio, esto fue realizado de forma incremental, definiendo para cada unidad de cama adicional, dónde debería ser ubicada, lo que reduce la cantidad de resoluciones a 15×3. El pseudo-algoritmo presentado es del estilo "un paso a la vez", abriendo H (en este caso 3) caminos en cada paso, similar a lo que haría una heurística *greedy* para resolver un problema del vendedor viajero, en que se mueve al mejor nodo disponible en el momento para seguir avanzando pero, en este caso, hasta que no convenga seguir avanzando.

El desarrollo y resultados de la heurística anterior se puede apreciar en la Figura 6.5, en la que se observa que la metodología determina que es conveniente agregar una cama adicional siempre al Hospital BL hasta un total de 9 camas. Esto ocurre dada su alta demanda y especialización de ciertos grupos. Recién cuando se llega a dicho valor, el modelo determina conveniente agregar una cama adicional en algún otro hospital (EP o SB). Esto es debido a que, a ese nivel de cantidad de camas, el hospital BL logra cierto equilibrio entre su oferta y demanda, que permite derivar a menos pacientes de forma proactiva y

Heurística 5 Determinación de la ubicación de nuevas camas en la red

1: Inicializar el mismo set de pacientes para cada ejecución a realizar, según la cantidad de réplicas a realizar en la simulación, para correr escenarios pareados.
2: Determinar $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$ de la AOP con la configuración de camas actual de la red.
3: Determinar el costo descontado esperado sobre todas las réplicas para la configuración.
4: **repetir**
5: **para cada** $h \in$ conjunto de hospitales **hacer**
6: Obtener $\mathbf{U}^*$ y $\mathbf{D}^*$ de la AOP dada una cama adicional en h.
7: Determinar el costo descontado esperado sobre todas las réplicas con esa cama adicional agregada a h.
8: **fin del para cada**
9: Determinar el hospital que generaría mayor ahorro en el costo descontado esperado.
10: **si** Existe al menos un hospital que genere ahorro en el costo descontado esperado, **entonces**
11: Sea $\widehat{h}$ ese hospital.
12: Agregar una cama adicional a $\widehat{h}$, que quedará oficial para el resto del algoritmo.
13: **fin del si**
14: **hasta que** Ninguna cama adicional genere ahorros, o se haya alcanzado un máximo de camas predefinido según presupuesto.

reactiva al sector privado. De todas formas, se sigue presenciando un decrecimiento en las economías de escala de tener más camas.

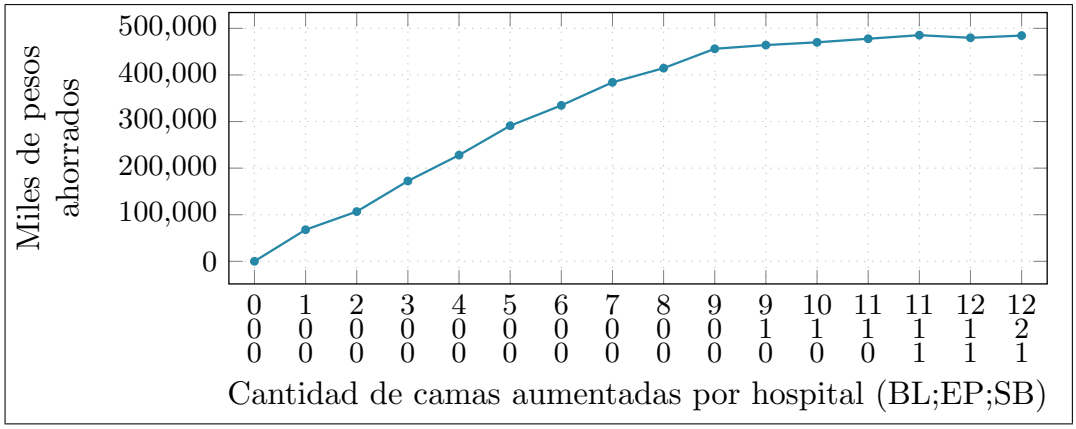


Figura 6.5. Aumento del ahorro a medida que se va fijando la ubicación de la nueva cama crítica. El eje horizontal muestra en vertical la cantidad de camas aumentadas para el hospital Bl, EP y SB respectivamente.

Al igual que para la situación anterior, la Figura 6.5 no considera el gasto de inversión correspondiente a las nuevas camas críticas. Al considerar el mismo costo de agregar una cama crítica considerado anteriormente, se obtiene la Figura 6.6. Esta permite ilustrar que el enfoque presentado en esta tesis no solamente permite determinar que existe un óptimo por hospital, si no que además permite determinar un óptimo en la cantidad de camas a aumentar a nivel de sistema. Esto ya genera un beneficio por sobre el caso de la Figura 6.4, en la que se indicaba que la cantidad óptima a aumentar son 9 camas.

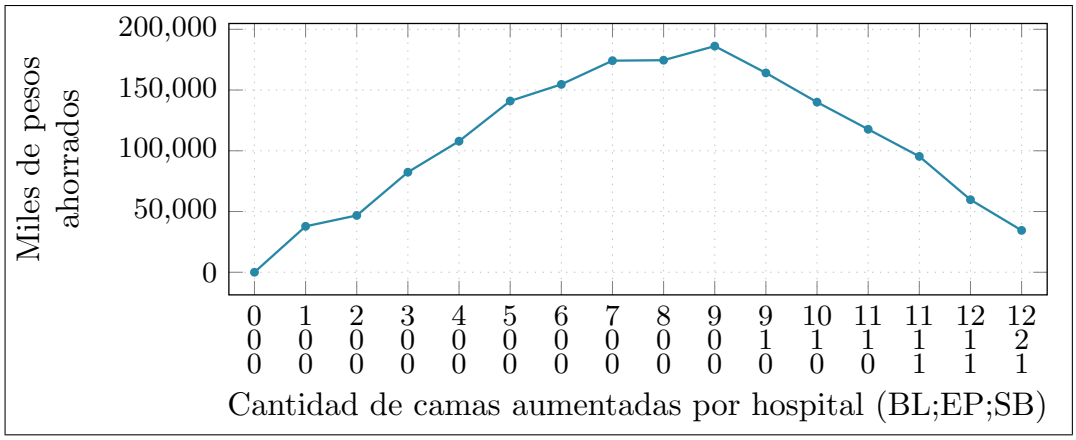


Figura 6.6. Aumento del ahorro a medida que se va fijando la ubicación de una nueva cama crítica considerando el gasto por cama.

Los resultados presentados, dado el costo por cama arbitrario escogido, indican que solamente es necesario hacer expansión para un solo hospital y no a nivel de sistema. Nuevamente, esto ocurre dada la especialización del hospital BL. Así, para el sistema chileno y bajo las tasas de entradas, tiempos de estadía promedio obtenidos, y el costo de cama arbitrario escogido, al momento de expandir su capacidad, convendría hacerlo agregando 9 camas críticas UCI al hospital BL. Cualquier otra cama adicional, generaría más costos que beneficios esperados.

6.1.2.4. Aumento de capacidad con el gasto real de camas

Consideremos ahora cómo sería el uso de la metodología recién presentada para determinar si conviene o no aumentar la cantidad de camas para el SSMS, según las tasas de entrada y tiempos de estadía obtenidos.

Diversas fuentes consideran que el costo de integrar una nueva cama crítica a un hospital puede variar entre 150 mil (contacto del Hospital Marcoleta UC) y más de 300 mil dólares (Obregón, 2012). Este monto consideraría la misma cama con pesa, más un monitor con tres canales, un respirador, un ventilador mecánico no invasivo, bombas de infusión de drogas, colchón antiescaras, 50 % del sueldo de una enfermera y el 100 % del sueldo de un Técnico en Enfermería Nivel Superior, los dos últimos descontados al día de hoy.

Por un lado, se tiene que el costo de agregar una cama, en el mejor de los escenarios, es de CLP$ 110,000,000. Por otro lado, el ahorro en el hospital en el que una cama crítica adicional genera más valor (ver Tabla 6.7) es de CLP$ 67,812,300 descontado de un período infinito. Esto indica que, para los niveles de demanda y oferta con los que se cuenta, basta solamente con utilizar políticas proactivas de transferencias de pacientes, sin aumentar capacidad. No es el mismo escenario si se considera el valor de una cama adicional sin transferencias proactivas (ver Tabla 6.8), en que sí se genera un beneficio. Sin embargo, se puede apreciar de forma directa que el mejor escenario es implementar las políticas proactivas obtenidas con la metodología presentada.

6.1.3. Desempeño del enfoque propuesto para el estudio de transferencias interhospitalarias de pacientes UCI a nivel regional

En esta subsección se presentará el procedimiento y resultado de resolver el problema de transferencia de pacientes entre Servicios de Salud, en busca de determinar si es conveniente considerar proactividad en los movimientos. Para ello, se siguió el ajuste a la modelación presentada en la Sección 5.2. Se formuló el problema a partir de datos obtenidos del Ministerio de Salud, que considera capacidades y tiempos de estadía promedio

de los pacientes *derivados* para cada uno de los hospitales de la red metropolitana. Se considerará esta información como representativa para los tiempos de estadía generales.

Dado lo acotado de la información y el formato de la base de datos recibida, fue necesario combinar algunas Categorías Diagnósticas Mayores, reduciendo la cantidad de grupos relacionados de diagnóstico (GRDs) a un total de $G = 14$. Por ejemplo, para lograr la categoría del Minsal "Órganos de los sentidos y cuello" se agregó la información de "Ojo" y de "Oído, Nariz, Boca y Garganta" que se utilizan en Canadá. El detalle de los grupos considerados se presenta en la Tabla 6.9. Los costos de derivación fueron ponderados de igual forma que para la Subsección 6.1.1, en base al peso de cada categoría según lo indicado por el American Federal Register (1983).

ID	Name
g01	Neurológicas y Neuroquirúrgicas No Traumáticas
g02	Órganos De Los Sentidos (Ojo, Boca, Nariz, Oído) y Cuello
g03	Respiratorias
g04	Cardio Circulatorias
g05	Digestivas
g06	Osteomuscular y Tejido Conectivo
g07	Piel y Tejido Subcutáneo No Sistémico
g08	Endocrinas, Nutricionales y Metabólicas
g09	Renal Genitourinario
g10	Embarazo, Parto Y Puerperio
g11	Sangre, Órganos Hematopoyéticos e Inmunitario No Oncológico
g12	Neoplasias y Tumores
g13	Infecto-Contagiosas y Parasitarias
g14	Traumatismo, Autólisis y Envenenamiento

Tabla 6.9. Grupos de diagnóstico utilizados para la aplicación a los servicios de salud y para la inclusión de pacientes UTI en el caso real.

Las Tablas 6.10 y 6.11 muestran las tasas de entrada y los tiempos de estadía promedio utilizados para esta instancia, las cuales son agrupados según los seis SSs y se encuentran resumidos en la Tabla 6.12. Una vez más, se asumió una distribución de Poisson para el número de llegadas y distribución geométrica para los tiempos de estadía que definen las probabilidades de alta de los pacientes. Lo primero a notar es lo alto de las utilizaciones

implícitas y de los tiempos de estadía, en comparación con los presentados en la Subsección 6.1.1. Esto se puede deber a la fiabilidad de los datos, dado que fueron provistos solamente los tiempos de estadía de los pacientes derivados y, por ende, no de todos los pacientes atendidos en la red, perjudicando la representatividad de la información. Además, se tiene una cierta cantidad de llegadas de pacientes al día, pero no los tiempos de estadía para algunos grupos de pacientes (e.g., g02 y SSMC). Para la resolución, se asume que esos SSs sí reciben pacientes de ese grupo, pero no tienen la capacidad resolutiva para atenderlo, por lo que deben transferirse a otro SS o bien derivarlos al privado.

Tabla 6.10. Tasas de llegada, en pacientes/día, utilizados para el caso con información agrupada a nivel de servicios de salud (λ_{hg}).

		Grupos Relacionados de Diagnóstico													
		g01	g02	g03	g04	g05	g06	g07	g08	g09	g10	g11	g12	g13	g14
Servicio de Salud	SSMOC	0,72	0,40	0,51	4,44	0,51	0,30	0,23	0,30	0,31	0,29	0,33	0,34	0,58	0,91
	SSMC	0,63	0,37	0,71	4,07	0,50	0,30	0,24	0,33	0,35	0,30	0,33	0,32	0,60	0,60
	SSMN	0,11	0,08	0,21	3,13	0,11	0,07	0,05	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,15	0,20
	SSMO	0,78	0,50	0,79	11,05	0,52	0,33	0,26	0,37	0,38	0,33	0,37	0,37	0,62	0,74
	SSMSO	0,60	0,36	0,44	3,10	0,37	0,25	0,20	0,26	0,27	0,24	0,27	0,28	0,35	0,54
	SSMS	0,77	0,39	0,58	9,06	0,42	0,32	0,25	0,33	0,34	0,30	0,38	0,35	0,59	0,69

Tabla 6.11. Largos de estadía promedio, en cantidad de días, utilizados para el caso de información agrupada a nivel de servicios de salud, asociados con ρ_{hgl}.

		Grupos Relacionados de Diagnóstico													
		g01	g02	g03	g04	g05	g06	g07	g08	g09	g10	g11	g12	g13	g14
Servicio de Salud	SSMOC	26,63	9,00	42,98	15,80	30,56	6,00	39,00	6,00	17,88	4,25		40,00	37,92	18,83
	SSMC	21,11		45,61	33,44	49,39			30,75	24,17	11,40	22,00	23,50	27,20	18,57
	SSMN	25,31		23,66	24,93	27,44		16,67	19,43	31,96	7,05		14,00	25,80	25,70
	SSMO	26,14		14,49	30,94	9,55	11,50			3,00	21,50		44,50	6,00	44,12
	SSMSO	17,83		20,68	13,61	15,95	173,00	50,00	11,96	22,92	10,28		9,00	20,81	21,88
	SSMS	21,40	8,83	18,02	19,98	20,03	20,33	7,00	14,00	19,31	12,67	29,67	54,50	17,04	24,53

Asumiendo representatividad de estos datos, se obtuvo la AOP asociada a las decisiones de admisión, transferencia y derivación de pacientes entre SSs. Bajo la configuración presentada, el algoritmo de generación de columnas tardó 1 hora y 39 minutos en obtener los coeficientes de la AOP. En la Tabla 6.13 se muestra de forma resumida el resultado, ilustrando cuántos coeficientes de transferencia (de los $6 \cdot 5 \cdot 14 = 420$) fueron negativos (y, por lo tanto, proactivos), y cuántos coeficientes de derivación (de los 84) fueron negativos.

Tabla 6.12. Resumen de los datos utilizados para la aplicación al sistema de servicios de salud del sector metropolitano.

		Tasa de entrada promedio	Tiempo de estadía promedio	Capacidad	Utilización implícita
Servicio de Salud	SSMOC	10,15 pac/día	22,68 días	47 camas	430,58 %
	SSMC	9,64 pac/día	27,92 días	47 camas	576,15 %
	SSMN	4,47 pac/día	21,99 días	11 camas	946,59 %
	SSMO	17,41 pac/día	21,17 días	53 camas	836,34 %
	SSMSO	7,53 pac/día	32,33 días	39 camas	396,80 %
	SSMS	14,78 pac/día	20,52 días	49 camas	613,71 %
Global		63,99 pac/día	24,38 días	246 camas	600,12 %

Esta tabla permite ilustrar que, efectivamente, sí conviene hacer movimientos proactivos (y no en una cantidad menor), dada la alta ocupación de los servicios de salud.

Tabla 6.13. Resumen de los valores de los coeficientes obtenidos para la resolución del caso de los SSs del sistema metropolitano.

		SSMOC	SSMC	SSMN	SSMO	SSMSO	SSMS
$Z_{hig}, (h \neq i)$	Cant de coeficientes que indican transferencias proactivas	42	22	21	15	45	36
	Cantidad de coeficientes que indican transferencias reactivas	28	48	49	55	25	34
	Cantidad de coeficientes de recepciones de transferencias proactivas	20	38	37	43	14	29
	Cantidad de coeficientes de recepciones de transferencias reactivas	50	32	33	27	56	41
Y_{hgp}	Cantidad de coeficientes que indican derivación proactiva	11	10	10	10	12	14
	Cantidad de coeficientes que indican derivación indiferente	0	0	0	4	2	0
	Cantidad de coeficientes que indican derivación reactiva	3	4	4	0	0	0

Como se puede apreciar en la tabla, existe una redistribución de atenciones. Dada la alta porción de pacientes que son proactivamente derivados y/o transferidos a otro establecimiento antes que ser atendidos en el hospital al que llegan. Esto habla de la capacidad del enfoque de solución para obtener políticas que efectivamente liberen estrés al sistema al tercerizar los grupos necesarios y re-distribuir la atención de los grupos según las especializaciones de los hospitales para cada grupo por separado. En particular, los grupos g1,

g3, g5 y g9 son aquellos que siempre es preferible derivar al privado antes que atender en el hospital al de llegada.

Por ende, bajo la información con la que se cuenta, la recomendación es centralizar la administración de los SSs y coordinar sus movimientos dirigiendo a los pacientes a nuevos destinos a pesar de que exista capacidad en los hospitales de llegada.

Desempeño computacional de la metodología

Ya se ha resuelto el problema para dos instancias de tamaño similar al de un problema del mundo real: uno que cuenta con 20 grupos de diagnóstico y 3 hospitales, y otro que cuenta con 14 grupos de diagnóstico y 6 hospitales. Además, las tasas de entradas, tiempos de estadía y capacidades hospitalarias son basadas en sistemas reales. Ahora se buscará evaluar el desempeño computacional del algoritmo ante diversos tamaños de instancias, para ver cómo va escalando el tiempo de resolución y obtención de la AOP.

Este experimento se realizó en base a la información provista por el Ministerio de Salud, que también fue utilizada para la resolución de la subsección anterior. Como se contó con la información a nivel hospitalaria, se comenzó, en principio, considerando solamente tres *sectores* de la región metropolitana: el centroccidente, el nororiente y el suroriente. A medida que se fueron obteniendo resultados, se fue desagregando cada sector de forma de llegar a considerar cada origen/destino público como un sólo SS, con lo que fue posible determinar políticas de transferencia entre SSs (como presentado en la Subsección 6.1.3). Luego, se siguió desagregando cada uno de los SSs, considerando separadamente los hospitales más grandes como aparte, para idealmente llegar a un escenario en que cada hospital es un hospital por sí sólo dentro de esta red.

La Figura 6.7 y la Tabla 6.14 muestran el desempeño temporal obtenido al resolver todas las instancias que tardaron menos de 48 horas en obtener una solución. Todas las instancias fueron resueltas en el mismo computador, caracterizado anteriormente en 5.1.3.1 (página 43).

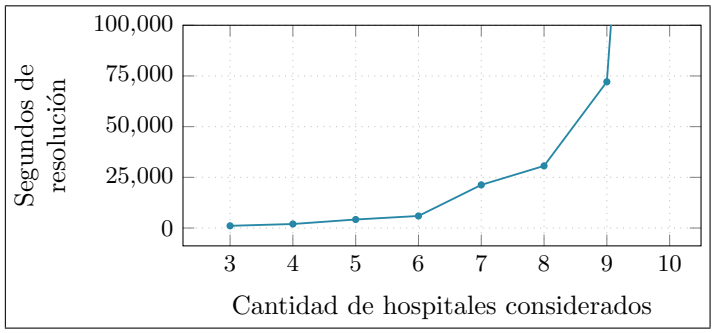


Figura 6.7. Tiempo de resolución según la cantidad de hospitales considerados en cada la instancia.

Tabla 6.14. Tiempo de resolución según el tamaño de la instancia.

Cantidad de hospitales	Segundos de resolución	Horas de resolución	Comparación con $H = 3$
3	1 091,37	0,30	1x
4	1 983,21	0,55	1,8x
5	4 202,31	1,17	3,9x
6	5 946,03	1,65	5,4x
7	21.269,64	5,90	19,5x
8	30.642,56	8,51	28,1x
9	72.131,28	20,07	66,1x
10	172.800,00+	48,00+	158,3x+

Como se puede apreciar, el algoritmo responde bien a instancias de gran tamaño, considerando que el SS de mayor tamaño considera 6 hospitales con UCI. De todas formas, la sugerencia es que si se deseara resolver este problema para un sistema de granularidad mayor a $H = 9$, primero deben agrupar nuevamente los GRDs para que el tamaño general del problema disminuya. De todas formas, es fundamental contar con información confiable para que las políticas generadas sean adecuadas para la red a la que se desean aplicar.

6.2. Políticas públicas para la red UCI y UTI

De forma similar que a la Sección 6.1, en esta sección se considerará un sistema de hospitales basado en la realidad para determinar el desempeño operacional y computacional

de la metodología presentada en la Sección 5.3, que determina políticas de transferencia interhospitalarias de pacientes UCI o UTI.

Bajo la sugerencia del Departamento de Gestión de Redes Asistenciales (DIGERA) del Minsal, se utilizará como configuración el Servicio de Salud Metropolitano Sur Oriente (SSMSO) (a diferencia de la Subsección 6.1.1, en que se estudia el SSMS), dado que posee Unidades de Tratamientos Intermedios mejor compuestos. Este servicio cuenta con tres hospitales que poseen camas UCI y camas UTI: Complejo Hospitalario Dr. Sótero del Río (SR), Hospital Clínico Metropolitano La Florida Dra. Eloisa Diaz Insunza (ED) y Hospital Padre Alberto Hurtado San Ramón (AH).

En esta instancia, se considera información provista por el Ministerio de Salud, indicando el largo promedio de estadía de pacientes UCI y UTI en general para este conjunto de hospitales, junto a sus capacidades. La distribución de las tasas de entradas fueron ajustadas siguiendo la misma proporción que la utilizada para los pacientes UCI en la Subsección 6.1.1. Esta decisión está basada en que cada hospital tiene cierta región previamente definida de atención.

Para poder considerar la información provista por el Minsal, nuevamente se utilizaron 14 Categorías Diagnósticas Mayores, indicadas en la Tabla 6.9. También, dado lo altamente agregada que se encuentra la información entregada, nuevamente se asumen que la llegadas de los pacientes siguen un proceso de Poisson, mientras que los tiempos de estadía se distribuyen geométricamente.

En las Tablas 6.15 y 6.16 se presenta de forma agregada la información para cada uno de los tres hospitales, para pacientes UTI y UCI (mayor detalle en las Tablas 6.17 y 6.18). En estas tablas se puede apreciar una utilización implícita UTI menor que la UCI, debido principalmente a la mayor cantidad de camas UTI disponibles en la red, y al menor tiempo de estadía de los pacientes de este nivel de complejidad. Dado que el objetivo de esta subsección (dado que no se pudo recibir toda la información) es medir el desempeño

de la política para un caso basado en la realidad y no obtener una política exacta, los resultados de utilización implícita obtenidos no son considerados como problema.

Tabla 6.15. Resumen de datos de los pacientes UCI utilizados para la simulación del caso práctico.

		Tasa de entrada promedio	Tiempo de estadía promedio	Capacidad	Utilización implícita
Hosp.	SR	10,08 pac/día	4,19 días	24 camas	114,97 %
	ED	1,48 pac/día	5,82 días	9 camas	97,62 %
	AH	1,08 pac/día	5,38 días	6 camas	102,10 %
Global UCI		12,64 pac/día	5,13 días	39 camas	108,99 %

Tabla 6.16. Resumen de datos de los pacientes UTI utilizados para la simulación del caso basado en la realidad.

		Tasa de entrada promedio	Tiempo de estadía promedio	Capacidad	Utilización implícita
Hosp.	SR	15,67 pac/día	2,40 días	36 camas	66,27 %
	ED	2,24 pac/día	3,11 días	15 camas	44,85 %
	AH	1,65 pac/día	3,07 días	10 camas	57,11 %
Global UTI		19,57 pac/día	2,86 días	61 camas	59,50 %

Tabla 6.17. Tasas de llegada (λ_{hgc}), en pacientes/día, utilizado en la aplicación práctica del caso UCI-UTI.

			Major Diagnostic Group (MDG)													
			g01	g02	g03	g04	g05	g06	g07	g08	g09	g10	g11	g12	g13	g14
Complej./Hosp.	UCI	SR	0,16	0,12	0,18	8,10	0,15	0,13	0,10	0,16	0,16	0,14	0,15	0,16	0,14	0,22
		ED	0,07	0,10	0,21	0,30	0,11	0,05	0,05	0,06	0,08	0,06	0,08	0,07	0,16	0,10
		AH	0,19	0,07	0,08	0,15	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,16
	UTI	SR	0,24	0,19	0,29	12,76	0,21	0,20	0,15	0,23	0,22	0,23	0,21	0,24	0,19	0,31
		ED	0,12	0,16	0,29	0,44	0,16	0,07	0,08	0,08	0,11	0,08	0,13	0,11	0,24	0,16
		AH	0,26	0,10	0,14	0,24	0,11	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,12	0,25

La Tabla 6.19 muestra algunos indicadores de desempeño obtenidos al simular las políticas presentadas a lo largo de este documento para este caso de tamaño basado en la realidad. Se puede ver que, una vez más, la metodología propuesta en esta tesis se comporta de forma superior. Si bien hay una mayor cantidad de derivaciones y de transferencias a nivel general (AOP), se aprecia un menor costo descontado y costo diario promedio que en

Tabla 6.18. Tiempo de estadía promedio, en días, asociado a los valores de ρ_{hgcl} para la aplicación práctica del caso UCI-UTI.

			Major Diagnostic Group (MDG)													
			g01	g02	g03	g04	g05	g06	g07	g08	g09	g10	g11	g12	g13	g14
Complej./Hosp.	UCI	SR	7,73	12,22	8,75	2,36	3,04	1,10	3,36	1,65	4,34	2,91	2,08	1,44	4,63	3,04
		ED	6,97	4,89	8,10	4,12	6,23	5,76	5,77	4,16	5,22	2,71	7,67	6,70	7,82	5,37
		AH	6,26	2,47	9,81	4,48	5,23	4,72	5,26	3,62	4,56	2,34	7,20	5,48	7,48	6,49
	UTI	SR	6,9	6,82	3,53	1,29	1,22	0,61	1,87	1,11	2,82	1,72	1,16	0,80	1,42	2,36
		ED	6,79	2,73	2,82	2,15	3,47	3,21	3,22	2,32	1,43	2,37	4,28	3,74	4,36	0,58
		AH	3,96	1,38	5,07	2,70	3,88	0,06	0,25	0,78	4,79	1,31	4,01	3,06	8,10	3,62

la situación con el proceder actual (MP). En particular, el costo diario promedio disminuye en un 35,26 %. La política permite esto al hacer un uso adecuado de la capacidad asociada con ambos niveles de complejidad, permitiendo una correcta distribución promedio de los pacientes que llegan.

Tabla 6.19. Comparación entre la política miope y una política óptima aproximada que permite que pacientes UTI ocupen camas UCI, para un caso basado en la realidad, con respecto a diversas medidas de desempeño. El margen de error es el correspondiente a un nivel de confianza de 95 %.

	MP	AOP	Δ %
Internado directo	16 141,5 ± 22,8	15 792,1 ± 21,1	–2,16 %
UCI intern. directo en UCI	5 797,6 ± 14,5	5 434,1 ± 10,1	–6,27 %
UTI intern. directo en UTI	10 343,9 ± 18,7	10 329,4 ± 18,8	–0,14 %
UTI intern. directo en UCI	0,0 ± 0,0	28,6 ± 1,3	–
Transferencias	916,5 ± 7,8	1 218,8 ± 7,8	+32,98 %
UCI transf. y atend. en UCI	884,0 ± 7,7	1 196,6 ± 7,7	+35,36 %
UTI transf. y atend. en UTI	32,5 ± 2,2	21,3 ± 1,6	–34,46 %
UTI transf. y atend. en UCI	0,0 ± 0,0	1,0 ± 0,2	–
Derivaciones	992,6 ± 16,4	1 109,4 ± 9,4	+11,77 %
Derivaciones UCI	992,6 ± 16,4	1 109,4 ± 9,4	+11,77 %
Derivaciones UTI	0,1 ± 0,1	0,0 ± 0,0	–100,00 %
Costo descontado	1 433 449 ± 57 157	934 373 ± 29 475	–34,82 %
Costo diario promedio	28 968 ± 382	18 753 ± 216	–35,26 %

Por otro lado, la Tabla 6.20 muestra que se hace un mejor uso general de los hospitales. Esto lo logra dado que prioriza la atención de pacientes, según su grupo, en un balance

entre los hospitales que más eficientemente resuelven su tipo de diagnóstico y la capacidad existente en cada hospital. Esto permite, una vez más, un uso más eficiente en la capacidad de atención en aquellos hospitales que permiten atender de forma más eficiente los pacientes, y más holgura a aquellos hospitales que pueden tener una mayor demanda de pacientes en general.

Tabla 6.20. Comparación de las ocupaciones obtenidas a partir de la simulación de la política miope (MP) versus la política óptima aproximada (AOP) para el caso basado en la realidad.

	MP	AOP
Ocupación SR	77,39 %	73,05 %
Ocupación ED	62,85 %	57,96 %
Ocupación AH	70,15 %	65,10 %
Ocupación global	72,74 %	68,16 %

Sobre el desempeño computacional de la metodología, esta tardó casi 6 horas en obtener la AOP. Por otro lado, los tiempos de ejecución para el algoritmo de simulación fue cercano a los 45 minutos. Estos tiempos son considerados más que razonables, teniendo en consideración el tamaño del sistema de salud y la cantidad de grupos registrada por el Ministerio de Salud; y dado que la política a obtener está diseñada para ser utilizada por un gran número de meses.

7. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

7.1. Conclusiones principales

Este documento de tesis presenta una metodología que utiliza programación dinámica estocástica aproximada para resolver el problema de decidir si admitir un paciente al hospital al que llega, transferirlo a otro hospital público, o derivarlo a una clínica, dentro de una red público-privada de hospitales. Generalmente estas decisiones se toman considerando exclusivamente el costo inmediato de las transferencias y las derivaciones, sin considerar el impacto que esas decisiones pueden tener sobre el desempeño futuro del sistema. En otras palabras, estas decisiones se toman de forma reactiva. Usando programación lineal para formular un Proceso de Decisión Markoviano (MDP) descontado sobre un horizonte infinito de tiempo, y una estructura afín para aproximar la función de valor del modelo, la metodología propuesta ofrece una forma sistemática de determinar políticas de admisión, transferencia y derivación de pacientes para este tipo de problemas. Si bien las políticas presentadas pueden ser sub-óptimas, al obtenerse mediante una aproximación, se traducen en una reducción en el gasto estatal significativo.

La metodología fue aplicada en diversos problemas, con el fin de responder algunas preguntas como: ¿Existe una forma de hacer transferencias y derivaciones proactivas de pacientes UCI que resulte mejor económicamente hablando que la reactiva? De ser así, ¿se puede determinar qué tipo de pacientes y hacia dónde deben ser transferidos/derivados? ¿Se puede utilizar esta metodología para determinar el valor de una cama adicional? ¿Se puede determinar cuántas camas es conveniente agregar a un sistema público de hospitales utilizando esta metodología? ¿Se puede aplicar a una red de Servicios de Salud? ¿Existe una forma proactiva de transferir y derivar a pacientes UTI, además de los UCI, en una red para generar ahorro estatal? ¿Cómo se pueden obtener esas políticas?

El enfoque de solución presentado en esta tesis permite responder todas las preguntas planteadas anteriormente. De este modo, permite al tomador de decisiones contar con una metodología para identificar qué pacientes deben ser transferidos/derivados, y hacia

dónde, y mejorar el desempeño del sistema. Además, la metodología propuesta permite lidiar con instancias de tamaño real y obtener políticas ajustadas a la realidad de cada red de hospitales, superando así la maldición de la dimensionalidad. Desde un nivel práctico, esta tesis permite avanzar en la definición de políticas y guías de asignación de pacientes a las camas de una red de hospitales. Se proveen resultados que van en pos de mejorar el uso de la capacidad hospitalaria a través de políticas proactivas, además de dar luces de cómo utilizarla para determinar políticas de expansión de capacidad en la red. Siguiendo estas políticas, el tomador de decisiones puede lograr que el sistema se anticipe a la demanda de pacientes, y moverlo a un estado deseado en lugar de dejarlo a la merced de la llegada de pacientes. Con todo lo anterior, se llega a una de las principales conclusiones de esta tesis: efectivamente la mejor política no es necesariamente esperar a que el hospital se encuentre lleno para transferir/derivar a un paciente. Al contrario, es mejor optar por movimientos proactivos en casos donde puede ser ventajoso.

La metodología propuesta también trae beneficios desde un punto de vista estratégico. Al generar órdenes de preferencia al momento de decidir dónde atender a los pacientes, según grupo de diagnóstico, es natural pensar en especializar algunos hospitales según los diagnósticos que más atenderá. Esto permitiría atender a incluso más pacientes en estos hospitales, además de lograr tener un mejor resultado en su salud. A su vez, si se sigue la política de admisión, transferencia y derivación obtenida, se sabe qué clínicas privadas serán las más solicitadas para resolver qué tipo de grupos de pacientes. Tras estudiar qué grupo de pacientes terminarán siendo los más derivados a privados (dada, también, la frecuencia de llegada), se pueden obtener beneficios enormes para poder definir contratos más adecuados para la atención de estos pacientes y lograr mejores precios de atención. Incluso, se puede llevar a una licitación más transparente que genere más competitividad entre los privados, al dar a conocimiento el uso de esta herramienta. Eso sí, como se presentó anteriormente, cambios en los costos de derivación traen consigo cambios en los órdenes de preferencia de transferencia, por lo que hay que considerar esto junto con la especialización como un todo para lograr mayor eficiencia económica a nivel de red.

El enfoque de solución propuesto puede ser aplicado a cualquier sistema de hospitales en que los pacientes puedan ser transferidos o derivados entre establecimientos para generar un mejor uso de las capacidades y especializaciones hospitalarias. Sin embargo, también puede ser aplicada a otros rubros similares. Por ejemplo, el problema que solamente considera transferencia de pacientes UCI podría aplicarse a un servicio de despacho a domicilio que funcione las 24 horas y que funcione por sucursales conectadas. De esta forma, el despacho a domicilio puede salir de cualquier sucursal que sea parte de este sistema centralizado. En ese caso, los recursos son el personal de despacho que pueden ser enviados con una orden de una sucursal distinta a la que recibió la orden. Por otro lado, en el sector público, otra aplicación puede ser un sistema de cárceles en que la asignación de presos a recintos carcelarios considera de forma proactiva la capacidad (en cantidad de celdas), tasas de llegada de prisioneros y tiempos de sentencia.

En conclusión, para un tomador de decisiones centralizado, el enfoque de solución presentado puede ser muy útil para definir políticas de transferencia y tratamiento que podría resultar en ahorros significativos en los gastos en salud, junto con aumentar la cantidad de pacientes que pueden ser admitidos en la red. Este enfoque puede ser muy beneficioso para casos como el de Chile, el Reino Unido o los Estados Unidos, donde la capacidad del sistema público de hospitales es tal que se debe recurrir frecuentemente al sistema privado para suplir el exceso de demanda.

7.2. Limitantes y trabajo futuro

La principal limitante del trabajo presentado es que, para poder implementar este enfoque de solución y obtener beneficios similares a los presentados, los hospitales de la red pública deben compartir información lo más cercano posible a lo que se conoce como "tiempo real". Además, deben, o bien coordinarse entre ellos para hacer las transferencias y derivaciones directas, como es el caso de Canadá, en donde manejan un *dashboard online* que les permite ver la ocupación de UCIs de manera provincial (Shahpori et al., 2013); o bien dejar esas decisiones para un tomador de decisiones centralizado, como la Unidad

de Gestión Centralizada de Camas (UGCC) en Chile. La importancia de la coordinación entre hospitales para lograr una mayor atención de pacientes en la red pública también es destacada por Litvak et al. (2008). En cualquier caso, es fundamental tomar el desafío de realizar capacitaciones en cada uno de los hospitales y en la UGCC sobre esto, para que todos estén en línea y puedan trabajar de forma sincronizada.

Un segundo desafío importante, que trae consigo la segunda limitante del enfoque, es la fiabilidad de la información. Es fundamental contar con información que sea representativa de los hospitales. Esto considera tanto tiempos de llegada de pacientes, por hospital (sean o no derivados), junto a los tiempos de estadía para cada grupo de diagnóstico a considerar. Por otro lado, como se pudo apreciar en los análisis de sensibilidad realizados, los costos también juegan un rol fundamental. Es muy importante ser capaz de afinar la estimación de los parámetros de los costos utilizados, tanto de transferencia interhospitalaria como de atención en hospitales públicos y en cada uno de los centros privados. Si no es posible determinar correctamente los costos asociados a cada grupo de diagnóstico, sí es posible llevar a cabo estudios que permitan estimar los costos basados en las actividades requeridas por los pacientes UCI, por paciente y por día cama (Alvear et al., 2010, 2012, 2013a,b). Es fundamental que, para estudiar bien estos costos, se consideren aquellos factores que efectivamente los influyen, para no hacer sobre-trabajo (Rodríguez-Montoya et al., 2015).

Otro desafío que trae consigo la aplicación de la metodología es el hecho de que la red hospitalaria suele ir en expansión. El mero hecho de que un hospital cambie su cantidad de camas UCI o UTI provoca tener que resolver el problema nuevamente. Sin embargo, cabe notar que sí se presentó un plan de expansión que *incluye* las políticas proactivas de transferencia y derivación de pacientes. Por lo mismo, si se siguiera el plan propuesto (considerando, por supuesto, mejores parámetros de tasas de llegada, tiempos de estadía y costos), esto no debería presentar un problema.

Esta tesis doctoral sugiere diversos estudios propuestos como trabajo futuro, que pueden llevar a bastantes líneas de investigación nuevas. A enumerar:

- El enfoque de solución presentado considera una aproximación lineal. Esto significa que, independiente de la cantidad de pacientes en un hospital actualmente (aunque sea 1), si la política indica transferir a otro hospital, esa es la instrucción a seguir. Esto, en promedio, resulta beneficioso, sobre todo en sistemas generalmente congestionados. Sin embargo, para sistemas en los que no existe una saturación constante, o presenta alta estacionalidad, podría presentarse una disminución en el beneficio logrado o, incluso, un empeoramiento. La política hoy en día es capaz de determinar si conviene o no ser proactivo, pero sería interesante desarrollar otros enfoques de resolución para estos problemas que no sean lineales. Hay trabajos que han mostrado mejores resultados para otros tipos de enfoque, como la iteración de política o la iteración de la función valor (Lagos, 2019; Lagos et al., 2020). Sería interesante ver cómo pueden resultar las políticas y desempeño obtenidos con otras metodologías u aproximaciones no lineales.
- Actualmente se está asumiendo que la cantidad de ambulancias de los sistemas es ilimitado. Cabe preguntarse, ¿cómo serán las políticas y el desempeño del sistema si se considera una cantidad limitada de ambulancias?
- Actualmente se considera una sola política a seguir para siempre (o hasta que la estructura del sistema cambie). Sin embargo, como es conocido, la estacionalidad de la demanda en el sector de salud es muy marcada a lo largo del año. Por ahora, para lidiar con esto se propone generar un modelo con parámetros promedio para cada estación del año, lo que permitiría obtener 4 conjuntos de coeficientes Z e Y que definirían 4 políticas distintas, una para cada mes. También se podría hacer lo mismo a nivel de mes (12 políticas distintas). Sin embargo, si bien hacer esto es factible, esto perdería el beneficio de lo *estacionario* de la política obtenida. En cambio, se podrían buscar herramientas alternativas, o incluso modelos alternativos, que permitan considerar de mejor forma la estacionalidad del sistema.
- Otra extensión que permite un estudio completo viene del hecho de que actualmente todos los costos, tanto en públicos como privados, son determinísticos, independiente del largo de estadía. Se podría realizar un estudio que considere que

los costos de atención en público y/o privado sean aleatorios, de forma de analizar cómo se altera la política obtenida.

- Es conocido el asunto de la escacez de camas UCI en el país. Sin embargo, la situación es similar para la capacidad (incluyendo camas, equipamiento y personal) para las Unidad de Tratamientos intermedios (UTI) (Albert, 2015). Podría adaptarse la heurística presentada en el segundo problema para definir un plan de expansión de capacidad para UTIs y UCIs simultáneamente, que permita determinar las políticas públicas también de movimiento proactivo de pacientes.
- Si lo que importa son los tiempos de resolución para obtener las políticas de admisión, transferencia y derivación, se podría considerar como trabajo futuro realizar mejoras en el procedimiento de generación de columnas para reducirlos, o explorar otros enfoques de descomposición.

BIBLIOGRAFÍA

Adelman, D. (2004). A Price-Directed Approach to Stochastic Inventory/Routing. *Operations Research*, *52*(4), 499–514. Descargado de http://www.jstor.org/stable/30036604 doi: 10.2307/30036604

Adelman, D. (2007). Dynamic Bid Prices in Revenue Management. *Operations Research*, *55*(4), 647–661. Descargado de http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1060.0368 doi: 10.1287/opre.1060.0368

Adelman, D., and Klabjan, D. (2012). Computing near-optimal policies in generalized joint replenishment. *INFORMS Journal on Computing*, *24*(1), 148–164. doi: 10.1287/ijoc.1100.0433

Adelman, D., and Mersereau, A. J. (2008). Relaxations of weakly coupled stochastic dynamic programs. *Operations Research*, *56*(3), 712–727. doi: 10.1287/opre.1070.0445

Agarwal, R., and Ergun, Ö. (2008). Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping. *Transportation Science*, *42*(2), 175–196. Descargado de http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1070.0205 doi: 10.1287/trsc.1070.0205

Albert, C. (2015, Dec). *Urgencias de hospitales públicos en la UTI: Dramática falta de especialistas, equipos y camas.* https://www.ciperchile.cl/2015/11/18/urgencias-de-hospitales-publicos-en-la-uti-dramatica-falta-de-especialistas-equipos-y-camas. CIPER Chile. ([Online; accessed 05-Marzo-2021])

Alvear, S., Canteros, J., Jara, J., and Rodríguez, P. (2013a). Costeo basado en actividades: Una metodología de gestión en tratamientos intensivos. *Revista Médica de Chile*, *141*(11), 1371–1381. doi: 10.4067/S0034-98872013001100002

Alvear, S., Canteros, J., Jara, J., and Rodríguez, P. (2013b). Costos reales de tratamientos intensivos por paciente y día cama. *Revista Médica de Chile*, *141*(2), 202–208. doi: 10.4067/S0034-98872013000200009

Alvear, S., Canteros, J., Jara, J., Rodríguez, P., Mujica, V., and Vorphal, U. (2012). Determinación y análisis de costos reales de tratamientos intensivos por paciente y día cama. *Revista Chilena de Medicina Intensiva*, *27*(1), 7–14. doi: 10.4067/S0034-98872013000200009

Alvear, S., Canteros, J., and Rodríguez, P. (2010). Estudio retrospectivo de costos de tratamientos intensivos por paciente y día cama. *Revista Médica de Chile*, *138*(5), 558–566. doi: 10.4067/s0034-98872010000500005

American Federal Register. (1983). *Table 5: List of diagnosis-related groups, relative weighting factors, mean length of stay, and length of stay outlier cutoff points used in the prospective payment system.*

American Hospital Association. (2019). *Fast facts on US hospitals.* American Hospital Association. Descargado 2018-01-08, de http://www.aha.org/research/rc/stat-studies/fast-facts.shtml

Aravena, P., and Inostroza, M. (2015). ¿Salud Pública o Privada? Los factores más importantes al evaluar el sistema de salud en Chile. *Revista médica de Chile*, *143*, 244–24451. doi: 10.4067/S0034-98872015000200012

Armony, M., Chan, C. W., and Zhu, B. (2018). Critical Care Capacity Management: Understanding the Role of a Step Down Unit. *Production and Operations Management*, *27*(5), 859–883. doi: 10.1111/poms.12825

Babonneau, F., Nesterov, Y., and Vial, J.-P. (2012). Design and Operations of Gas Transmission Networks. *Operations Research*, *60*(1), 34–47. Descargado de http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1110.1001 doi: 10.1287/opre.1110.1001

Ben Abdelaziz, F., and Masmoudi, M. (2012). A multiobjective stochastic program for hospital bed planning. *Journal of the Operational Research Society*, *63*(4), 530–538. Descargado de http://dx.doi.org/10.1057/jors.2011.39 doi: 10.1057/jors.2011.39

Ben Bachouch, R., Guinet, A., and Hajri-Gabouj, S. (2012). An integer linear model for

hospital bed planning. *International Journal of Production Economics*, *140*(2), 833–843. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.07.023 doi: 10.1016/j.ijpe.2012.07.023

Berlinguet, M., Vertrees, J., Freedman, R., DÁndrea, R., and Tinker, A. (1983). Case-Mix Analysis Across Patient Populations and Boundaries: A Refined Classification System Designed Specifically for International Use. *Journal of Medical Systems*, *7*(5), 409–412. Descargado de http://solutions.3m.com/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?assetId=1180606514484{&}assetType=MMM{_}Image{&}blobAttribute=ImageFile

Bertsekas, D. P. (2011). Approximate Dynamic Programming. En *Dynamic programming and optimal control, volume ii* (Vol. II, pp. 327–552). Descargado de http://scholar.google.com/scholar?hl=en{&}btnG=Search{&}q=intitle:Dynamic+Programming+and+Optimal+Control+3rd+Edition{#}9 doi: 10.1.1.141.6891

Bhattacharjee, P., and Ray, P. K. (2014). Patient flow modelling and performance analysis of healthcare delivery processes in hospitals: A review and reflections. *Computers and Industrial Engineering*, *78*, 299–312. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2014.04.016 doi: 10.1016/j.cie.2014.04.016

Bikker, I. A., Mes, M. R., Sauré, A., and Boucherie, R. J. (2018). Online Capacity Planning for Rehabilitation Treatments: an Approximate Dynamic Programming Approach. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 1–25. doi: 10.1017/s0269964818000402

Brown, D. B., Smith, J. E., and Sun, P. (2010). Information relaxations and duality in stochastic dynamic programs. *Operations Research*, *58*(4 PART 1), 785–801. doi: 10.1287/opre.1090.0796

Busse, R., Geissler, A., Quentin, W., and Wiley, M. (2011). *Diagnosis-Related Groups in Europe Moving towards transparency , efficiency*.

Canadian Institute for Health Information. (2016). *Care in Canadian ICUs* (Inf. Téc. n.º

August.) Ottawa, Ontario.

Capkun, V., Messner, M., and Rissbacher, C. (2012). Service specialization and operational performance in hospitals. *International Journal of Operations and Production Management*, *32*(4), 468–495. doi: 10.1108/01443571211223103

Cardoso, T., Oliveira, M. D., Barbosa-Póvoa, A. P., and Nickel, S. (2015). An integrated approach for planning a long-term care network with uncertainty, strategic policy and equity considerations. *European Journal of Operational Research*, *247*(1), 321–334. Descargado de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715004865 doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.074

Cataldo, A., Ferrer, J. C., Rey, P. A., and Sauré, A. (2017). Design of a Single Window System for e-Government Services: The Chilean Case. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 175–196. Descargado de http://arxiv.org/abs/1502.04725 doi: 10.3934/jimo.2017060

Chan, C. W., Farias, V. F., and Escobar, G. J. (2017). The Impact of Delays on Service Times in the Intensive Care Unit. *Management Science*, *63*(July 2017), 2049–2072.

Chao, X., Liu, L., and Zheng, S. (2003a). Resource Allocation in Multisite Service Systems with Intersite Customer Flows. *Management Science*, *49*(12), 1739–1752. Descargado de http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.49.12.1739.25110 doi: 10.1287/mnsc.49.12.1739.25110

Chao, X., Liu, L., and Zheng, S. (2003b). Stochastic Network Models and Optimization of a Hospital System. En *Stochastic modeling and optimization* (pp. 363–393). New York, NY: Springer.

Chávez, M. (2018, oct). *Hospitales han gastado $7 mil millones más que en 2017 en arrendar camas al sector privado.* Santiago. Descargado de http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=511327

De Bruin, A. M., Van Rossum, A. C., Visser, M. C., and Koole, G. M. (2007). Modeling the emergency cardiac in-patient flow: An application of queuing theory. *Health Care Management Science*, *10*(2), 125–137. doi: 10.1007/s10729-007-9009-8

De Corte, A., and Sörensen, K. (2013). Optimisation of gravity-fed water distribution network design: A critical review. *European Journal of Operational Research*, *228*(1), 1–10. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.046 doi: 10.1016/j.ejor.2012.11.046

de Farias, D. P., and Roy, B. V. (2004). On Constraint Sampling in the Linear Programming Approach to Approximate Dynamic Programming. *Mathematics of Operations Research*, *29*(3), 462–478. Descargado de https://doi.org/10.1287/moor.1040.0094 doi: 10.1287/moor.1040.0094

de Farias, D. P., and Roy, B. V. (2006). A Cost-Shaping Linear Program for Average-Cost Approximate Dynamic Programming with Performance Guarantees. *Mathematics of Operations Research*, *31*(3), 597–620. Descargado de https://doi.org/10.1287/moor.1060.0208 doi: 10.1287/moor.1060.0208

Dobson, G., Lee, H.-H., and Pinker, E. (2010). A Model of ICU Bumping. *Operations Research*, *58*(6), 1564–1576. Descargado de http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1100.0861 doi: 10.1287/opre.1100.0861

Eastaugh, S. R. (1992). Hospital specialization and cost efficiency: Benefits of trimming product lines. *Hospital and Health Services Administration*, *37*(2), 223–235.

Eichholz, J. C., Hartard, S., and Hurtado, I. (2010). *UGCC: Gestionando la Salud Pública en Red.*

Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M., and Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers and Industrial Engineering*, *62*(1), 368–407. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020 doi: 10.1016/j.cie.2011.08.020

Fowler, R. A., Abdelmalik, P., Wood, G., Foster, D., Gibney, N., Bandrauk, N., ... Jouvet, P. (2015). Critical care capacity in Canada: results of a national cross-sectional study. *Critical Care*, *19*(1), 133. Descargado de http://ccforum.com/content/19/1/133 doi: 10.1186/s13054-015-0852-6

Georgiadis, M. C., Tsiakis, P., Longinidis, P., and Sofioglou, M. K. (2011). Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega*, *39*(3),

254–272. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2010.07.002 doi: 10.1016/j.omega.2010.07.002

Ghatee, M., and Hashemi, S. M. (2009). Engineering Applications of Artificial Intelligence network under uncertainty $. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *22*(4-5), 796–807. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2009.01.003 doi: 10.1016/j.engappai.2009.01.003

Gocgun, Y., Bresnahan, B. W., Ghate, A., and Gunn, M. L. (2011). A Markov decision process approach to multi-category patient scheduling in a diagnostic facility. *Artificial Intelligence in Medicine*, *53*(2), 73–81. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.artmed.2011.06.001 doi: 10.1016/j.artmed.2011.06.001

González, J. (2017). *Gestión de flujo de pacientes críticos mediante una política proactiva de traslados* (Tesis de Master, Pontificia Universidad Católica de Chile). https://www.repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/21491.

González, J., Ferrer, J.-C., Cataldo, A., and Rojas, L. (2018). A proactive transfer policy for critical patient flow management. *Health Care Management Science*, 1–17. doi: 10.1007/s10729-018-9437-7

Gopakumar, B., Wang, S., Khasawneh, M. T., Srihari, K., Gandhi, T., and Saunders, N. (2009). A systems approach for hospital inpatient bed capacity planning. *IEEM 2009 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 744–748. doi: 10.1109/IEEM.2009.5372930

Grand-Clement, J., Chan, C. W., Goyal, V., and Escobar, G. (2020). Robust Policies For Proactive ICU Transfers. *CoRR*, *abs/2002.0*(2002). Descargado de http://arxiv.org/abs/2002.06247

Green, L. V. (2005). Capacity Planning and Management in Hospitals. En M. L. Brandeau, F. Sainfort, and W. P. Pierskalla (Eds.), *Operations research and health care: A handbook of methods and applications* (pp. 15–41). Boston, MA: Springer US. Descargado de https://doi.org/10.1007/1-4020-8066-2{_}2http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-8066-2{_}2http://link.springer.com/10.1007/1-4020-8066-2{_}2 doi: 10.1007/1-4020-8066-2_2

Griffin, J., Xia, S., Peng, S., and Keskinocak, P. (2012). Improving patient flow in an obstetric unit. *Health Care Management Science*, *15*(1), 1–14. doi: 10.1007/s10729-011-9175-6

Hailemariam, D. A. (2016). *Modeling of admission control and patient transfer decisions in multi-hospital systems* (PhD Thesis, State University of New York). Descargado de http://libproxy.library.wmich.edu/login?url=https://search.proquest.com/docview/1810971683?accountid=15099{%}0Ahttp://primo-pmtna01.hosted.exlibrisgroup.com/openurl/01WMU/01WMU{_}SERVICES??url{_}ver=Z39.88-2004{&}rft{_}val{_}fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation{&}genr

Harper, P. R., and Shahani, A. K. (2002). Modelling for the planning and management of bed capacities in hospitals. *Journal of the Operational Research Society*, *53*(1), 11–18. doi: 10.1057/palgrave/jors/2601278

Helm, J. E., Ahmadbeygi, S., and Van Oyen, M. P. (2011). Design and analysis of hospital admission control for operational effectiveness. *Production and Operations Management*, *20*(3), 359–374. doi: 10.1111/j.1937-5956.2011.01231.x

Hernández, P., Alonso-Ayuso, A., Bravo, F., Escudero, L. F., Guignard, M., Marianov, V., and Weintraub, A. (2012). A branch-and-cluster coordination scheme for selecting prison facility sites under uncertainty. *Computers and Operations Research*, *39*(9), 2232–2241. doi: 10.1016/j.cor.2011.11.006

Hsu, C. I., and Wen, Y. H. (2002). Reliability evaluation for airline network design in response to fluctuation in passenger demand. *Omega*, *30*(3), 197–213. doi: 10.1016/S0305-0483(02)00027-0

Hu, W., Chan, C. W., Zubizarreta, J. R., and Escobar, G. J. (2018). An Examination of Early Transfers to the ICU Based on a Physiologic Risk Score. *Manufacturing & Service Operations Management*, *20*(3), 531–549. doi: 10.1287/msom.2017.0658

Hulshof, P. J., Mes, M. R., Boucherie, R. J., and Hans, E. W. (2016). *Patient admission planning using Approximate Dynamic Programming* (Vol. 28) (n.º 1-2). Springer US.

Descargado de http://dx.doi.org/10.1007/s10696-015-9219-1 doi: 10.1007/s10696-015-9219-1

Joosten, T., Bongers, I., and Janssen, R. (2009). Application of lean thinking to health care: issues and observations. *International journal for quality in health care : journal of the International Society for Quality in Health Care / ISQua*, *21*(5), 341–7. Descargado de http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2742394{&}tool=pmcentrez{&}rendertype=abstract doi: 10.1093/intqhc/mzp036

Kao, E. P. C., and Tung, G. G. (1981). Bed Allocation in a Public Health Care Delivery System. *Management Science*, *27*(5), 507–520. Descargado de http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.27.5.507 doi: 10.1287/mnsc.27.5.507

Kim, S.-H., Chan, C., Olivares, M., and Escobar, G. J. (2015). ICU Admission Control: An Empirical Study of Capacity Allocation and Its Implication on Patient Outcomes. *Management Science*, *61*(January 2015), 19–38. doi: 10.2139/ssrn.2062518

Koizumi, N., Kuno, E., and Smith, T. E. (2005). Modeling Patients Flows Using a Queueing Network with Blocking. *Health Care Management Science*, *8*, 49–60. doi: 10.1007/s10729-005-5216-3

Kokangul, A. (2008). A combination of deterministic and stochastic approaches to optimize bed capacity in a hospital unit. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *90*(1), 56–65. doi: 10.1016/j.cmpb.2008.01.001

Kuiper, A., Lee, R., Ham, V., and Does, R. (2021). A reconsideration of Lean Six Sigma in healthcare after the COVID-19 crisis. *International Journal of Lean Six Sigma*, *ahead-of-print*. doi: 10.1108/IJLSS-01-2021-0013

Lagos, C. (2019). *Un modelo de optimización dinámica para la planificación eficiente de tareas de manteminiento de aviones* (Tesis de Master, Pontificia Universidad Católica de Chile). https://www.repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/22975.

Lagos, C., Delgado, F., and Klapp, M. A. (2020). Dynamic Optimization for Airline Maintenance Operations. *Transportation Science*, *54*(4), 998–1015. Descargado de https://doi.org/10.1287/trsc.2020.0984 doi: 10.1287/trsc.2020.0984

Lakshmi, C., and Iyer, S. A. (2013). Application of queueing theory in health care: A literature review. *Operations Research for Health Care*, *2*(1-2), 25–39. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.orhc.2013.03.002 doi: 10.1016/j.orhc.2013.03.002

Lara, B. A., Cataldo, A., Castro, R., Aguilera, P. R., Ruiz, C., and Andresen, M. (2016). Medicina de urgencia y unidades de cuidados intensivos: Una alianza necesaria en busca de la mejoría de la atención de pacientes críticos. *Revista médica de Chile*, *144*(7), 917–924.

Leiva, L. (2016, sep). *Estado paga el triple del costo público por pacientes de Fonasa derivados a clínicas.* Santiago. Descargado de https://www.latercera.com/noticia/estado-paga-el-triple-del-costo-publico-por-pacientes-de-fonasa-derivados-a-clinicas/

Litvak, N., van Rijsbergen, M., Boucherie, R. J., and van Houdenhoven, M. (2008). Managing the overflow of intensive care patients. *European Journal of Operational Research*, *185*(3), 998–1010. doi: 10.1016/j.ejor.2006.08.021

Lotfi, M., and Behnamian, J. (2022). Collaborative scheduling of operating room in hospital network: Multi-objective learning variable neighborhood search[Formula presented]. *Applied Soft Computing*, *116*, 108233. Descargado de https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108233 doi: 10.1016/j.asoc.2021.108233

Mahar, S., Bretthauer, K. M., and Salzarulo, P. A. (2011). Locating specialized service capacity in a multi-hospital network. *European Journal of Operational Research*, *212*(3), 596–605. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.03.008 doi: 10.1016/j.ejor.2011.03.008

Marianov, V., and Fresard, F. (2005). A procedure for the strategic planning of locations,

capacities and districting of jails: application to Chile. *Journal of the Operational Research Society*, *56*(3), 244–251. Descargado de http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601790 doi: 10.1057/palgrave.jors.2601790

Martínez, F. J., Tamblay, L., and Weintraub, A. (2011). School locations and vacancies: A constrained logit equilibrium model. *Environment and Planning A*, *43*(8), 1853–1874. doi: 10.1068/a43374

Mathews, K. S., and Long, E. F. (2015). A conceptual framework for improving critical care patient flow and bed use. *Annals of the American Thoracic Society*, *12*(6), 886–894. doi: 10.1513/AnnalsATS.201409-419OC

McManus, M. L., Long, M. C., Cooper, A., and Litvak, E. (2004). Queuing Theory Accurately Models the Need for Critical Care Resources. *Anesthesiology*, *100*(5), 1271–1276. doi: 10.1097/00000542-200405000-00032

Ministerio de Salud de Chile. (2018). *Unidad de Gestión Centralizada de Camas, UGCC*. Ministerio de Salud. Descargado 2018-01-08, de http://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2018/03/Informe-UGCC-2014-2018.pdf

Ministerio de Salud de Chile. (2019). *Protocolo de Getión de camas, Servicio de Salud Viña del Mar - Quillota 2017-2019* (Inf. Téc.). Servicio de Salud Viña del Mar Quillota.

Nasraway, S. A., Cohen, I. L., Dennis, R. C., Howenstein, M. A., Nikas, D. K., Warren, J., and Wedel, S. K. (1998). Guidelines on admission and discharge for adult intermediate care units. *Critical care medicine*, *26*(3), 607–610.

Nunes, L. G. N., de Carvalho, S. V., and Rodrigues, R. d. C. M. (2009). Markov decision process applied to the control of hospital elective admissions. *Artificial Intelligence in Medicine*, *47*(2), 159–171. doi: 10.1016/j.artmed.2009.07.003

Obregón, P. (2012). *EyN: Faltan 502 camas UCI y UTI para paliar déficit, un tercio de la actual capacidad.* http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=104325. ([Online; accessed 05-Mayo-2020])

Oh, S. H., Lee, S. J., Noh, J., and Mo, J. (2021). Optimal treatment recommendations for diabetes patients using the Markov decision process along with the South Korean electronic health records. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–10. Descargado de https://

doi.org/10.1038/s41598-021-86419-4 doi: 10.1038/s41598-021-86419-4

Olafson, K., Ramsey, C., Yogendran, M., Fransoo, R., Chrusch, C., Forget, E., and Garland, A. (2015). Surge capacity: Analysis of census fluctuations to estimate the number of intensive care unit beds needed. *Health Services Research*, *50*(1), 237–252. doi: 10.1111/1475-6773.12209

Ortega, M. (2018). *Descripción del modelo de hospitalización domiciliaria de un hospital público de chile* (Tesis de grado). Universidad Academia de Humanismo Cristiano.

Patrick, J., Puterman, M. L., and Queyranne, M. (2008). Dynamic Multipriority Patient Scheduling for a Diagnostic Resource. *Operations Research*, *56*(6), 1507–1525. Descargado de http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1080.0590 doi: 10.1287/opre.1080.0590

Pepper, S., Sepúlveda, K., and Campos, J. (2013). *Informe Final Programa Compra a Privados Del Programa De Prestaciones Valoradas.* Descargado Septiembre, 2019, de http://www.dipres.gob.cl/597/articles-139793{_}informe{_}final.pdf

Powell, W. B. (2011). *Approximate Dynamic Programming* (Vol. 2). Descargado de http://web.mit.edu/dimitrib/www/dpchapter.pdf doi: 10.1002/9780470182963

Puterman, M. L. (2005). *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. USA: John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1080/00401706.1995.10484354

Rodríguez-Montoya, R., Sandoval-Oliva, V., Cabrejo-Paredes, J., Chacón-Angulo, N., Chiquinta-Ramos, G., and Rodríguez-Montoya, M. (2015). Variables asociadas a costos en cuidados intensivos. *Revista de la Asociación Mexicana de Medicina Crítica y Terapia Intensiva*, *XXIX*(3), 138–144. Descargado de www.medigraphic.org.mx

Ruth, R. J. (1981). A Mixed Integer Programming Model for Regional Planning of a Hospital Inpatient Service. *Management Science*, *27*(5), 521–533. Descargado de http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.27.5.521 doi: 10.1287/mnsc.27.5.521

Sauré, A., Begen, M. A., and Patrick, J. (2020). Dynamic multi-priority, multi-class patient scheduling with stochastic service times. *European Journal of Operational Research*, *280*, 254–265. doi: 10.1016/j.ejor.2019.06.040

Sauré, A., Patrick, J., Tyldesley, S., and Puterman, M. L. (2012). Dynamic multi-appointment patient scheduling for radiation therapy. *European Journal of Operational Research*, *223*(2), 573–584. doi: 10.1016/j.ejor.2012.06.046

Sauré, A., and Puterman, M. L. (2017). Advance Patient Appointment Scheduling. En R. J. Boucherie and N. M. van Dijk (Eds.), *Markov decision processes in practice* (pp. 245–268). Cham: Springer International Publishing. Descargado de https://doi.org/10.1007/978-3-319-47766-4{_}8 doi: 10.1007/978-3-319-47766-4

Schilling, D. A., Jayaraman, V., and Barkhi, R. (1993). A review of covering problems in facility location. *Computers & Operations Research*.

Schwartz, S., and Cullen, D. J. (1981). How many intensive care beds does your hospital need? *Critical care medicine*, *9*(9), 625–629.

Schweitzer, P. J., and Seidmann, A. (1985). Generalized polynomial approximations in Markovian decision processes. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, *110*(2), 568–582. doi: 10.1016/0022-247X(85)90317-8

Shahpori, R., Gibney, N., Guebert, N., Hatcher, C., and Zygun, D. (2013). An on-line dashboard to facilitate monitoring of provincial ICU bed occupancy in Alberta, Canada. *Journal of Hospital Administration*, *3*(1), 47. doi: 10.5430/jha.v3n1p47

Shi, P., Chou, M. C., Dai, J. G., Ding, D., and Sim, J. (2016). Models and Insights for Hospital Inpatient Operations: Time-Dependent ED Boarding Time. *Management Science*, *62*(January 2016), 1–28.

Shu, J., Li, Z., Shen, H., Wu, T., and Zhong, W. (2012). A logistics network design model with vendor managed inventory. *International Journal of Production Economics*, *135*(2), 754–761. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.10.008 doi: 10.1016/j.ijpe.2011.10.008

Smith-Daniels, V. L., Schweikhart, S. B., and Smith-Daniels, D. E. (1988). Capacity management in health care services: Review and future research directions. *Decision*

Sciences, *19*(4), 889–919.

Troy, P. M., and Rosenberg, L. (2009). Using simulation to determine the need for ICU beds for surgery patients. *Surgery*, *146*(4), 608–620. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.surg.2009.05.021 doi: 10.1016/j.surg.2009.05.021

Uchida, K., Sumalee, A., Watling, D., and Connors, R. (2007). A study on network design problems for multi-modal networks by probit-based stochastic user equilibrium. *Networks and Spatial Economics*, *7*(3), 213–240. doi: 10.1007/s11067-006-9010-7

Vasilakis, C., and El-Darzi, E. (2001). A simulation study of the winter bed crisis. *Health care management science*, *4*(1), 31–6. Descargado de http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11315883 doi: 10.1023/A:1009649615548

Vreeken, M. (2021). *A policy approximation of a Markov decision process for scheduling clients in an outpatient mental healthcare clinic* (Tesis Doctoral, University of Twente). Descargado de https://essay.utwente.nl/88619/1/Vreeken_MA_EEMCS.pdf

Yale University School of Public Health. (1981). *The New ICD-9-CM Diagnosis Related Groups Classification Scheme: User Manual.* New Haven.

Zapata, M. (2018). Importancia del Sistema GRD para Alcanzar la Eficiencia Hospitalaria. *Revista Médica Clínica Las Condes*, *29*(3), 347–352. Descargado de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0716864018300592 doi: 10.1016/j.rmclc.2018.04.010

Zhu, Z., Hoon Hen, B., and Liang Teow, K. (2012, jan). Estimating ICU bed capacity using discrete event simulation. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, *25*(2), 134–144. Descargado de https://doi.org/10.1108/09526861211198290 doi: 10.1108/09526861211198290

A N E X O S

A. ANEXO A: DEMOSTRACIONES

A.1. Demostración de que el problema (5.12) tiene la estructura de un problema de flujo en redes a costo mínimo

Proposición 1 *El problema* (5.12) *es un problema de flujo en redes a costo mínimo.*

DEMOSTRACIÓN. Consideremos el modelo (5.12) escrito como uno de minimización, como se presenta en (A.1).

$$\min \quad c(\mathbf{s},\mathbf{a}) - (1-\gamma)\beta - \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L}\mu_{hgl}(\mathbf{s},\mathbf{a})U_{hgl} - \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\delta_{hg}(\mathbf{s},\mathbf{a})D_{hg} \tag{A.1a}$$

$$\text{s.t.} \quad d_{hg} = \sum_{i=1}^{H} z_{hig} + \sum_{p=1}^{P} y_{hgp} \qquad \forall h,g \tag{A.1b}$$

$$\sum_{g=1}^{G}\left[\sum_{l=1}^{L} u_{hgl} + \sum_{i=1}^{H} z_{ihg}\right] \leq K_h \qquad \forall h \tag{A.1c}$$

$$z_{hig} = 0 \qquad \forall (h,i,g) \in \mathcal{M} \tag{A.1d}$$

$$\mathbf{y},\mathbf{z},\mathbf{u},\mathbf{d} \geq \mathbf{0}. \tag{A.1e}$$

Se concluirá esto demostrando que todas las variables de decisión pueden ser considerados como flujo que recorre arcos de una red dirigida, y que todas las restricciones pueden ser considerados como balance de flujo para los diferentes nodos de esta red dirigida. Para hacer la demostración más ilustrativa, transformemos el problema (A.1) en el siguiente problema equivalente, que considera restricciones *dummy* (para tener un conjunto más claros de nodos en la red), variables auxiliares y variables de holgura en las restricciones de desigualdad (A.1c).

$$\min \quad c(\mathbf{s},\mathbf{a}) - (1-\gamma)\beta - \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L}\mu_{hgl}(\mathbf{s},\mathbf{a})U_{hgl} - \sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\delta_{hg}(\mathbf{s},\mathbf{a})D_{hg} \tag{A.2a}$$

$$\text{s.t.} \quad d_{hg} - \sum_{i=1}^{H} z_{hig} - \sum_{p=1}^{P} y_{hgp} = 0 \qquad \forall h, g \tag{A.2b}$$

$$\sum_{g=1}^{G} \left[\sum_{l=1}^{L} u_{hgl} + \sum_{i=1}^{H} z_{ihg} \right] + w_h = K_h \qquad \forall h \tag{A.2c}$$

$$z_{hig} = 0 \qquad \forall (h, i, g) \in \mathcal{M} \tag{A.2d}$$

$$\sum_{h=1}^{H} u_{hgl} - m_{gl} = 0 \qquad \forall g, l \tag{A.2e}$$

$$\sum_{h=1}^{H} \sum_{g=1}^{G} y_{hgp} - n_p = 0 \qquad \forall p \tag{A.2f}$$

$$\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{u}, \mathbf{d}, \mathbf{w}, \mathbf{m}, \mathbf{n} \geq \mathbf{0}. \tag{A.2g}$$

Representemos el conjunto de nodos como un nodo sumidero y cuatro conjunto de nodos: $\mathcal{N}_1 = \{(h, g) : h = 1, \ldots, H, g = 1, \ldots, G\}$, $\mathcal{N}_2 = \{h : h = 1, \ldots, H\}$, $\mathcal{N}_3 = \{(g, l) : g = 1, \ldots, G, l = 1, \ldots, L\}$, y $\mathcal{N}_4 = \{p : p = 1, \ldots, P\}$. Las restricciones (A.2b), (A.2c), (A.2e) y (A.2f) son restricciones de conservación de flujo para los nodos en $\mathcal{N}_1$, $\mathcal{N}_2$, $\mathcal{N}_3$ y $\mathcal{N}_4$, respectivamente. La restricción de conservación de flujo asociada al nodo sumidero es redundante, por lo que se omite del problema (A.2).

La variable de decisión z_{hig} es un arco que va desde el nodo $(h, g) \in \mathcal{N}_1$ al nodo $i \in \mathcal{N}_2$. Sin embargo, si $(h, i, g) \in \mathcal{M}$, como se indica en la restricción (A.2d), el arco asociado a esa variable de decisión z_{hig} no existe. La variable de decisión y_{hgp} es un arco que va desde el nodo $(h, g) \in \mathcal{N}_1$ al nodo $p \in \mathcal{N}_4$. La variable de decisión u_{hgl} es un arco que va desde el nodo $(g, l) \in \mathcal{N}_3$ al nodo $h \in \mathcal{N}_2$. La variable de decisión d_{hg} es un arco que va desde el nodo sumidero hacia el nodo $(h, g) \in \mathcal{N}_1$. La variable de decisión w_h es un arco que va desde el nodo sumidero hacia el nodo $h \in \mathcal{N}_2$. La variable de decisión m_{gl} es un arco que va desde el nodo sumidero hacia el nodo $(g, l) \in \mathcal{N}_3$. Finalmente, la variable de decisión n_p es un arco que va desde el nodo $p \in \mathcal{N}_4$ al nodo sumidero. La demande por el nodo $h \in \mathcal{N}_2$ es $K_h, \forall h$, mientras que todas la demanda de todos los otros nodos es cero.

Finalmente, dado que el problema (A.2) es equivalente a (5.12), se concluye que (5.12) es efectivamente un problema de flujo en redes a costo mínimo. Esta demostración sería equivalente para el modelo (5.14). □

A.2. Demostración que una distribución exponencial se puede discretizar como una distribución geométrica

Este anexo busca demostrar que se puede trabajar una distribución exponencial de forma discreta utilizando una distribución geométrica.

Consideremos el tiempo de estadía del paciente, una variable aleatoria que distribuye Exponencial($1/\theta$), en que θ es el tiempo de estadía promedio del paciente. Sea $\lambda = 1/\theta$ la tasa de atención promedio del hospital. Se sabe que la función acumulada de probabilidad de una exponencial es $F(\lambda, x) = 1 - e^{-\lambda x}$ (Figura A.1).

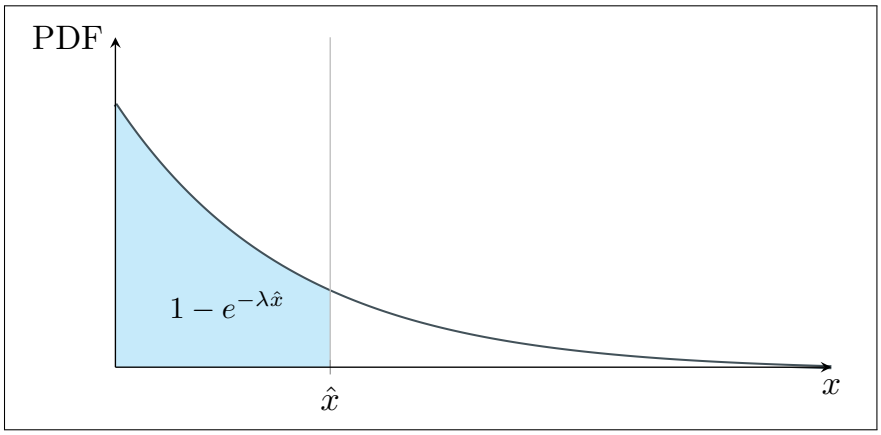


Figura A.1. Función acumulada de una distribución exponencial

Consideremos una discretización de períodos de largo d (Ver Figura A.2).

Definamos p_1 como la probabilidad de que un paciente se haya ido durante el transcurso del primer día.

$$p_1 = 1 - e^{-\lambda d}$$

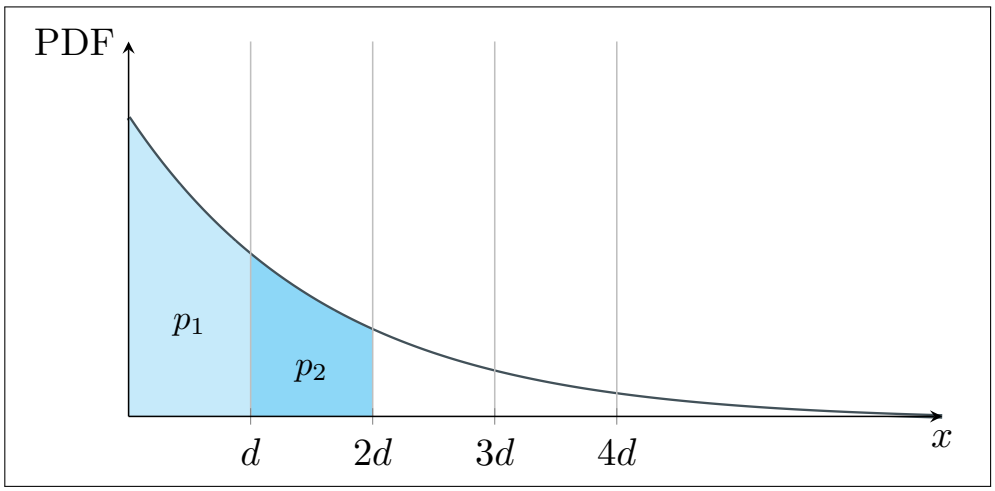


Figura A.2. Función acumulada discretizada de la distribución exponencial

Definamos también p_i como la probabilidad de que un paciente se haya ido durante el transcurso del día i.

$$p_i = (1 - e^{-\lambda id}) - (1 - e^{\lambda(i-1)d}) = e^{\lambda(i-1)d} - e^{-\lambda id}$$

Buscamos demostrar que la probabilidad de que esta discretización conserva la propiedad de la pérdida de memoria. En otras palabras, buscamos encontrar la probabilidad de que un paciente se vaya en el transcurso de un i-ésimo día, dado que no se ha ido antes de que comience el día i, y mostrar que es constante e igual a p_1.

Por Teorema de Bayes

$$\mathbb{P}(A|B) = \frac{\mathbb{P}(B|A)\,\mathbb{P}(A)}{\mathbb{P}(B)},$$

donde A es el evento de que el paciente salga en el transcurso del día i, y B es el evento de que el paciente no haya salido antes de que comience el día i.

$$\mathbb{P}(A) = p_i \qquad \mathbb{P}(B|A) = 1$$

$$\mathbb{P}(B) = 1 - \mathbb{P}(\text{haber salido antes de que comience } i) = 1 - (1 - e^{-\lambda(i-1)d}) = e^{-\lambda(i-1)d}$$

Así, $\mathbb{P}(A|B) = 1 - e^{-\lambda d} = p_1 \equiv p$. Podemos notar que la probabilidad es constante e independiente de i, por lo que conserva la propiedad de pérdida de memoria $\square$.

Buscaremos ahora construir la distribución asociada a la cantidad de períodos que un paciente está en el hospital. Para ello, determinemos las probabilidades asociadas.

Demostremos que la probabilidad de que un paciente se vaya en el i-ésimo día sigue una recursión definida por $p_i = p_{i-1}(1-p), \forall i \geq 2$. Lo haremos por inducción.

Dado el Teorema de Bayes, podemos concluir que la probabilidad de que el paciente se vaya durante el segundo día es

$$\frac{p_1}{1} = \frac{p_2}{1-p_1} \quad \Rightarrow \quad p_2 = (1-p)p$$

por lo que queda demostrado para $i = 2$. Ahora, para un i general,

$$\begin{aligned} p_{i-1}(1-p) &= \left(e^{-\lambda(i-2)d} - e^{-\lambda(i-1)d}\right)\left(1 - (1 - e^{-\lambda d}\right) \\ &= \left(e^{-\lambda(i-2)d} - e^{-\lambda(i-1)d}\right)\left(e^{-\lambda d}\right) \\ &= e^{-\lambda(i-1)d} - e^{-\lambda id} \\ &= p_i \end{aligned}$$

□

Por lo tanto, $p_i = (1-p)^{i-1}p$, que corresponde a la función de probabilidad de una distribución Geométrica(p).

Finalmente, se puede ilustrar que si acortamos los períodos lo suficientemente, la esperanza de esta distribución tiende a la de una exponencial. Sabemos que la media de una exponencial de parámetro λ es $1/\lambda = \theta$.

La esperanza de la geométrica X se calcula como

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^{\infty} p_i \cdot (id) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} (1-p)^{i-1} p \cdot id \\ &= pd \cdot \sum_{i=1}^{\infty} (1-p)^{i-1} i \end{aligned}$$

Se puede calcular el resultado de la serie $\sum_{i=1}^{\infty} r^{i-1} i$, que converge a $1/(r-1)^2$ si $|r| < 1$ (que, en este caso, sí corresponde). Por lo tanto

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[X] &= pd \cdot \frac{1}{(1-p-1)^2} = \frac{dp}{p^2} \\ &= \frac{d}{p}\end{aligned}$$

Finalmente, si calculamos

$$\lim_{d \to 0} \frac{d}{p} = \lim_{d \to 0} \frac{d}{1 - e^{-\lambda d}} = \frac{1}{\lambda} = \theta \qquad \square$$

Así, queda demostrado que, efectivamente, la distribución geométrica es la discretización de una distribución exponencial, y que la probabilidad de ocurrencia para un período avanzado dado que no ha ocurrido antes equivale a la probabilidad de ocurrencia para un período del mismo largo en el tiempo $x = 0$ (propiedad de pérdida de memoria). Esta probabilidad es $p = 1 - e^{-\lambda d} = 1 - e^{-d/\theta}$ para un período de largo d.

B. ANEXO B: EJEMPLOS ILUSTRATIVOS

Este anexo busca ilustrar las características de la AOP con ejemplos sencillos.

B.1. Ejemplo 1

Se considera un gasto de ambulancia de $f = 200$, un GRD A con tiempo de estadía promedio de 8 días y un GRD B con tiempo de estadía de 1 día. Se considera que actualmente hay un hospital con 1 cama disponible y el resto de los hospitales tiene muchas camas y baja congestión en promedio. Se considera un escenario en que llegan al hospital con una cama disponible un paciente promedio A en el día 1 y un paciente promedio B en cada día del 2 al 9.

Si se acepta el paciente del grupo A ocupando la única cama disponible que tiene el hospital, la cama estaría ocupada por los siguientes 8 días. Por lo mismo, en cada uno de los días 2 al 9, se tendría que transferir de forma reactiva a los pacientes del grupo B que llegan, generando un costo de $8 \cdot 200 = 1\,600$. En cambio, si se hubiera decidido derivar proactivamente al paciente del grupo A, la cama estaría disponible y se podría internar satisfactoriamente a cada uno de los pacientes del grupo B, ya que ocuparían la cama por 1 sólo día, generando un gasto de solamente $1 \cdot 200 = 200$.

B.2. Ejemplo 2

Consideremos el mismo ejemplo del Anexo B.1, asumiendo un costo total de derivación y atención en una clínica privada de $k = 8\,000$, con la salvedad de que todos los otros hospitales están, en promedio, más congestionados (a diferencia del otro ejemplo mencionado, en que el resto de los hospitales tienen baja congestión). Consideremos el mismo escenario en que llegan al hospital con una cama libre un paciente promedio A en el día 1 y un paciente promedio B en cada día del 2 al 9.

Si se acepta el paciente del grupo A ocupando la única cama disponible del sistema, la cama estaría ocupada por los siguientes 8 días. Por lo mismo, en cada uno de los días 2 al 9, se tendría que derivar de forma reactiva a todos los pacientes del grupo B que llegaron, generando un costo de $8 \cdot 8\,000 = 64\,000$. En cambio, si se hubiese decidido derivar proactivamente al paciente del grupo A a la clínica privada, la cama estaría disponible y se podría internar satisfactoriamente a cada uno de los pacientes del grupo B, ya que ocuparían la cama por 1 sólo día, generando un gasto de solamente $1 \cdot 8\,000 = 8\,000$.

B.3. Ejemplo 3

Se considera un gasto de ambulancia de $f = 200$, un GRD A con tiempo de estadía UCI promedio de 8 días y un GRD B con tiempo de estadía UCI promedio de 10 días. Supongamos que la UCI está casi a tope de congestionada. Supongamos además un costo de derivación y atención en el privado de $k_{UCI} = 10\,000$.

Por otro lado, supongamos que tenemos pacientes UCI que tardan 5 y 1 días en ser dados de alta, para los dos GRDs A y B, respectivamente. Y consideremos que su atención cuesta solamente $k_{UTI} = 4\,000$. Consideremos un escenario promedio de un hospital con dos camas disponibles UCI y una UTI. En este escenario, llega un paciente UCI de cada grupo en el día 1, llega un paciente UTI del grupo A en el día 1 y un paciente promedio B en cada día del 2 al 5.

- Si se dan las camas UCI a ambos pacientes UCI, y la cama UTI al paciente de larga estadía, se deberán derivar cuatro pacientes UTI ($4 \cdot 4\,000$), sumando un total de $16\,000$.
- Si se dan las camas UCI al paciente UTI del grupo A y a un paciente UCI del grupo B (el que menos tarda en desocuparla), y la cama UTI se deja disponible de forma proactiva, se deberán derivar a un paciente UCI del grupo A ($10\,000$) y a tres pacientes UTI ($4 \cdot 4\,000$), sumando un total de $26\,000$.

- Si se dejan las camas UCI solamente a los pacientes UTI, se estarían derivando a dos pacientes UCI, completando un total de $2 \cdot 10\,000 = 20\,000$.
- Si, sin embargo, se atiende a ambos UCI en sus camas, mientras que se deriva proactivamente al paciente UTI, quedaría una cama disponible para cada paciente que llegue en cada uno de los días siguientes. Solamente se incurriría en $4\,000$.

C. ANEXO C: CASOS CON HOSPITALES CON EL MISMO NIVEL DE ESPECIALIZACIÓN

Este anexo busca ilustrar las características de la AOP con ejemplos sencillos.

C.1. Caso 1 con hospitales con el mismo nivel de especialización

Consideramos el mismo caso expuesto en la Sección 5.1.3 pero con los mismos tiempos de estadía promedio para cada GRD para todos los hospitales (12 días y 6 días promedio para los grupos $g = 1$ y $g = 2$, respectivamente) (ver Tabla C.1b). Esto permite mostrar que la política define un orden de preferencia no solo cuando hay hospitales especializados, si no que también para aprovechar de mejor manera la capacidad disponible. Ante los mismos costos, se tienen los resultados de Z_{hig} y Y_{hgp} expuestos en la Tabla C.2.

Tabla C.1. Información de las tasas de llegada y tiempos promedio de estadía utilizados para el Caso 1 en que los hospitales tienen el mismo nivel de especialización.

(a) Tasas de llegada en pacientes UCI, en pacientes/día (λ_{hg}).

		GRD	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	0,50	0,30
	$h = 2$	0,70	0,40
	$h = 3$	0,85	0,55
	$h = 4$	0,80	0,65

(b) Largos de estadía promedio de pacientes UCI, en cantidad de días, asociados con ρ_{hgl}.

		GRD	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	12	6
	$h = 2$	12	6
	$h = 3$	12	6
	$h = 4$	12	6
Promedio		12	6

(c) Utilización implítica (implied utilization) de pacientes UCI, como porcentaje[1].

		Util. Implíc.
Hospital	$h = 1$	97,5 %
	$h = 2$	108,0 %
	$h = 3$	112,5 %
	$h = 4$	86,0 %
Global		102,26 %

Así, los hospitales públicos $h = 1, 2, 3$ preferirán derivar los pacientes del grupo $g = 1$ a clínicas privadas ($Y_{111}, Y_{211}, Y_{311} < 0$); mientras que el hospital $h = 4$ preferirá ingresarlos ($Z_{441} = 0$). Si este último hospital no tiene camas disponibles, la política sugiere transferirlos a cualquier otro hospital ($Z_{411} = Z_{421} = Z_{431} = 400$). Si ninguno tiene,

Tabla C.2. Valores de los coeficientes que definen la AOP para el Caso 1 con hospitales con el mismo nivel de especialización.

(a) Valores de los coeficientes Z_{hig}, asociado a transferencias a hospitales públicos.

		GRD $g=1$				GRD $g=2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de llegada	$h=1$	-	200	200	4	-	200	200	87,06
	$h=2$	200	-	200	4	200	-	200	87,06
	$h=3$	200	200	-	4	200	200	-	87,06
	$h=4$	396	396	396	-	312,95	312,95	312,95	-

(b) Valores de los coeficientes Y_{hgp}, asociados a derivaciones a clínicas privadas.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	167,76	3656,34
	$h=2$	167,76	3656,34
	$h=3$	167,76	3656,34
	$h=4$	363,76	3769,28

sugiere derivarlos a una clínica privada. Si consideramos pacientes del grupo $g = 2$, todos los hospitales respectivos buscarán ingresarlos primero y, en caso de no tener camas disponibles, transferirlos al hospital $h = 4$ ($Z_{h42} = 84{,}75, \forall h \neq 4$). Esto se explica ya que es el hospital con menor congestión. Si el hospital $h = 4$ tampoco tiene camas disponibles, entonces la AOP sugiere transferirlos a cualquiera de los otros hospitales antes de considerar derivarlos a clínicas privadas.

En resumen, el hecho de que los tiempos de estadía promedio de los pacientes del grupo $g = 1$ sean el doble que los del grupo $g = 2$, y que la tasa de llegada de pacientes del grupo $g = 1$ sea alta, en promedio, hace preferible que el hospital $h = 4$ sea el único que interne ese tipo de pacientes (dado su nivel de utilización de camas), mientras que todos los hospitales atenderán a los pacientes del grupo $g = 2$, siguiendo los órdenes de derivación recién indicados.

C.2. Caso 2 con hospitales con el mismo nivel de especialización

Consideremos un caso con $H = 2$ hospitales con capacidades de 12 y 1 camas, respectivamente. La información sobre las tasas de llegada y los tiempos de estadía se muestra en la Tabla C.3. Este caso permite justificar que las preferencias dadas el enfoque de solución presentado no son solamente debido al nivel de especialización de los hospitales, si no que

también el resultado de un buen uso de la capacidad disponible. Ante los mismos costos, se tienen los resultados de Z_{hig} y Y_{hgp} mostrados en la Tabla C.4.

Tabla C.3. Información de las tasas de llegada y tiempos promedio de estadía utilizados para el Caso 2 en que los hospitales tienen el mismo nivel de especialización.

(a) Tasas de llegada en pacientes UCI, en pacientes/día (λ_{hg}).

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	1	1
	$h=2$	1	$\frac{1}{8}$

(b) Largos de estadía promedio de pacientes UCI, en cantidad de días, asociados con ρ_{hgl}.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	1	8
	$h=2$	1	8
Promedio		1	8

(c) Utilización implícita (implied utilization) de pacientes UCI, como porcentaje.

		Util. Implíc.
Hosp.	$h=1$	75,00 %
	$h=2$	200,00 %
Global		92,67 %

Tabla C.4. Valores de los coeficientes que definen la AOP para el Caso 2 con hospitales con el mismo nivel de especialización.

(a) Valores de los coeficientes Z_{hig}, asociado a transferencias entre hospitales públicos.

		GRD $g=1$		GRD $g=2$	
		Hosp. de destino		Hosp. de destino	
		$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$
Hosp. de llegada	$h=1$	-	396,03	-	1126,57
	$h=2$	3,97	-	$-726,57$	-

(b) Valores de los coeficientes Y_{hgp}, asociado a derivaciones a clínicas privadas.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	8.400,00	8.400,00
	$h=2$	8.203,97	7.473,43

Así, la AOP sugiere que el hospital $h=2$ derive a todos sus pacientes del grupo $g=2$ al hospital $h=1$, independiente de si tiene o no camas disponibles para recibirlos. Esto hace que el número total de transferencias y derivaciones sea menor (ver Anexo B.1 para justificación). Solamente si el hospital $h=1$ no posee camas disponibles, el hospital $h=2$ internará dichos pacientes. Como última opción lo derivará al sector privado. Además, el hospital $h=2$ es indiferente entre internar o transferir a pacientes del grupo $g=1$. Por

otro lado, el hospital $h = 1$ debería ingresar a todos los pacientes y, como último recurso, recurrir al sector privado.

C.3. Caso 3 con hospitales con el mismo nivel de especialización y UTI

Consideremos un caso con $H = 2$ hospitales con capacidades de 12 y 1 camas UCI, respectivamente. Además, ambos hospitales cuentan con 1 cama UTI. La información sobre las tasas de llegada y los tiempos de estadía se muestra en la Tabla C.5. Este caso permite justificar que la preferencia de que un paciente UTI no ocupe proactivamente una cama UCI no se da siempre, sino que puede que los niveles de especialización y los tiempos de estadía sean tales que sea conveniente hacer esta ocupación proactiva, como resultado de un buen uso de la capacidad disponible. Ante los mismos costos que los presentados en 5.3.3.1 (página 78), se tienen los resultados de Z_{hgcij} y Y_{hgcp} mostrados en la Tabla C.6.

Así, la AOP sugiere que el hospital $h = 2$ derive a todos sus pacientes del grupo $g = 2$ al hospital $h = 1$, independiente de si tiene o no camas disponibles para recibirlos, como se puede apreciar en las celdas destacadas en gris (y por ende, salvo los pacientes UCI del grupo $g = 1$). Notar que esto significa, también, internar a pacientes UTI en camas UCI indistintamente. Esto hace que el número total de derivaciones sea menor en general, dado que el hospital $h = 1$ cuenta con mayor capacidad. Solamente si el hospital $h = 1$ no posee camas disponibles, el hospital $h = 2$ internará dichos pacientes. Como última opción lo derivará al sector privado. Además, se puede notar que los pacientes del grupo $g = 1$ también tienen como preferencia, ser atendidos en dicho hospital, ya sea en una cama UCI o en una cama UTI, dada la cantidad de camas UCI existentes. Como segunda opción para estos pacientes queda transferirlos al hospital $i = 2$, y como último recurso, al privado.

Tabla C.5. Información de las tasas de llegada y tiempos promedio de estadía utilizados para el Caso 3, en que los hospitales tienen UCI y UTI y el mismo nivel de especialización.

(a) Tasas de llegada de pacientes UCI, en pacientes/día (λ_{hg}).

		Group	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	1	1
	$h=2$	1	$\frac{1}{5}$

(b) Largos de estadía promedio de pacientes UCI, en cantidad de días, asociados con ρ_{hgl}.

		Group	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	1	5
	$h=2$	1	5
Average		1	5

(c) Utilización implícita (implied utilization) de pacientes UCI, como porcentaje[2].

		Implied util.
Hosp.	$h=1$	50,00 %
	$h=2$	200,00 %
Global		61,53 %

(d) Tasas de llegada de pacientes UTI, en pacientes/día (λ_{hg}).

		Group	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	1	$\frac{1}{8}$
	$h=2$	1	$\frac{1}{8}$

(e) Largos de estadía promedio de pacientes UTI, en cantidad de días, asociados con ρ_{hgl}.

		Group	
		$g=1$	$g=2$
Hosp.	$h=1$	1	8
	$h=2$	1	8
Average		1	8

(f) Utilización implícita (implied utilization) de pacientes UTI, como porcentaje[3].

		Implied util.
Hosp.	$h=1$	200,00 %
	$h=2$	200,00 %
Global		200,00 %

Tabla C.6. Valores de los coeficientes que definen la AOP para el Caso 3 con preferencia en la ocupación UTI-UCI

(a) Valores del coeficiente $Z_{h,g,UCI,i,UCI}$, asociado a transferencias de pacientes UCI en hospitales públicos.

		GRD $g=1$		GRD $g=2$	
		Hospital de destino		Hospital de destino	
		$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$
Hosp. de llegada	$h=1$	1000,00	1297,00	1000,00	1625,62
	$h=2$	1003,00	1000,00	674,38	1000,00

(b) Valores del coeficiente $Y_{h,g,UCI,1}$, asociado a derivaciones a clínicas privadas de pacientes UCI.

		GRD	
		$g=1$	$g=2$
Hosp. de llegada	$h=1$	9400,00	9250,00
	$h=2$	9400,00	8914,67

(c) Valores de los coeficientes $Z_{h,g,UTI,ij}$ e $Y_{h,g,UTI,1}$, asociado respectivamente a transferencias y derivaciones de pacientes UTI.

			$Z_{h,g,UTI,i,UCI}$		$Z_{h,g,UTI,i,UTI}$		$Y_{h,g,UTI,p}$
			Cama UCI en hosp. de dest.		Cama UTI en hosp. de dest.		A privado
			$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$	$p=1$
GRD $g=1$	Hosp. de llegada	$h=1$	0,00	297,00	0,00	203,00	6000,00
		$h=2$	97,00	94,00	97,00	0,00	5945,92
GRD $g=2$	Hosp. de llegada	$h=1$	0,00	845,53	0,00	400,75	6000,00
		$h=2$	$-100,75$	444,78	$-100,75$	0,00	5744,13

D. ANEXO D: CASOS CON CONFIGURACIONES PARTICULARES

Este anexo busca ilustrar AOPs y el comportamiento del enfoque para distintos casos particulares.

D.1. Caso con todos los hospitales teniendo la misma capacidad

Consideremos el caso base discutido en 5.1.3.1 (página 43), excepto que la capacidad de todos los hospitales es de 10 camas críticas. En este caso, la política resultante sugiere un orden de preferencia particular, buscando un mejor uso de la especialización de los distintos hospitales. Bajo la misma estructura de costos descritos en la Sección 5.1.3.1, los resultados para los coeficientes Z_{hig} y Y_{hgp} se describen en la Tabla D.1, donde es posible ver que existen algunas decisiones proactivas, como $Z_{311} = -200{,}46$, $Z_{132} = -85{,}48$, o $Y_{311} = -35{,}46$.

Tabla D.1. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso en que todos los hospitales tienen la misma capacidad.

(a) Valores del coeficiente Z_{hig} de transferencias a hospitales.

		Grupo $g=1$				Grupo $g=2$			
		Hospital de destino				Hospital de destino			
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
Hosp. de origen	$h=1$	0	175,18	500,46	297,00	0	61,56	–85,48	61,56
	$h=2$	124,82	0	475,29	271,82	238,43	0	3,00	150,00
	$h=3$	–200,46	–175,29	0	–53,46	385,48	297,00	0	297,00
	$h=4$	3,00	28,18	353,46	0	238,48	150,00	3,00	0

(b) Valores del coeficiente Y_{hg1} de derivaciones a clínicas.

		Grupo	
		$g=1$	$g=2$
Hospital	$h=1$	315,00	3 466,50
	$h=2$	289,82	3 554,94
	$h=3$	–35,46	3 701,94
	$h=4$	168,00	3 554,94

Cuando esta AOP se simula bajo la misma configuración de simulación que la presentada en la Sección 5.1.3.1, se obtiene una reducción en el costo diario promedio de un 4,2 % (6 946 $\pm$ 146 para la AOP versus 6 651 $\pm$ 118 para la Política Miope), resultado que es estadísticamente significativo con un p-value $< 0{,}0001$).

D.2. Caso en que un sólo hospital es levemente más especializado que el resto

Consideremos un caso en el que los pacientes del grupo $g = 1$ tienen todos el mismo tiempo de estadía entre todos los hospitales. El resto de los parámetros se mantiene igual al caso base mostrado en 5.1.3.1 (página 42). Esta configuración se describe en la Tabla D.2:

Tabla D.2. Información de las tasas de llegadas y tiempos de estadía utilizados para el caso de leve diferencia en especialización, junto a la utilización implícita resultante.

(a) Tasas de llegada de pacientes UCI, en pacientes/día (λ_{hg}).

		Grupo	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	0,50	0,30
	$h = 2$	0,70	0,40
	$h = 3$	0,85	0,55
	$h = 4$	0,80	0,65

(b) Largos de estadía promedio de pacientes UCI, en cantidad de días, asociados a ρ_{hgl}.

		Grupo	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	12	6,20
	$h = 2$	12	6,04
	$h = 3$	12	5,54
	$h = 4$	12	5,93
Promedio		12	6

(c) Utilización implícita de pacientes UCI, como porcentaje.

		Util. Implícita
Hospital	$h = 1$	98,3 %
	$h = 2$	108,2 %
	$h = 3$	110,4 %
	$h = 4$	89,7 %
Global		100,85 %

El valor de los coeficientes asociados a la política óptima aproximada (AOP) resultante para este caso se muestran en la Tabla D.3.

Tabla D.3. Valores de los coeficientes obtenidos para el caso con leve diferencia en especialización.

(a) Valores del coeficiente Z_{hig} de transferencias entre hospitales.

		Group $g = 1$				Group $g = 2$			
		Hospital transferred to				Hospital transferred to			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
Hosp. of arrival	$h = 1$	0	150.00	337.27	150.00	0	49.51	–166.91	–19.91
	$h = 2$	150.00	0	337.27	150.00	250.49	0	–66.42	80.58
	$h = 3$	–37.27	–37.27	0	–37.27	466.91	366.42	0	297.00
	$h = 4$	150.00	150.00	337.27	0	319.91	219.42	3.00	0

(b) Valores del coeficiente Y_{hg1} de derivaciones.

		Group	
		$g = 1$	$g = 2$
Hospital	$h = 1$	315.00	3,608.87
	$h = 2$	315.00	3,709.36
	$h = 3$	127.72	3,925.78
	$h = 4$	315.00	3,778.78

Es importante notar que incluso cuando no hay especialización para el grupo de pacientes $g = 1$ (i.e., todos los hospitales tienen el mismo tiempo de estadía promedio para el grupo $g = 1$), la AOP sugiere un orden de preferencia para transferir y derivar paciente, incluso de forma proactiva para algunos casos. Esto es una consecuencia de la diferencia tanto de capacidades como de las tasas de llegada de pacientes.

También se analizó la características de la AOP cuando un hospital (arbitrariamente el hospital $h = 3$ es más o menos especializado que los otros, que se mantienen con el mismo nivel de especialización. Particularmente, consideremos valores del tiempo de estadía promedio para el grupo $g = 1$ y el hospital $h = 3$ de 11,9, 12,1 y 12,2, y comparemos las AOPs resultantes. La comparación se ilustra en la Tabla D.4, que muestra un extracto de los valores de los coeficientes.

Es importante notar en este caso que los únicos cambios en los valores de los coeficientes ocuren cuando el hospital $h = 3$ es el origen o el destino de un paciente, mientras que el resto de los valores se mantienen igual al caso sin modificación. Esto tiene sentido si se considera que la utilización implícita de todos los otros hospitales se mantiene constante (dado que las tasas de llegada, tiempos de estadía promedio y capacidades de esos hospitales se mantuvieron constantes).

Cuando el hospital $h = 3$ es levemente más especializado que el resto de los hospitales (i.e., tiene menor tiempo de estadía promedio para los pacientes del grupo $g = 1$), la AOP sugiere que ese hospital es menos costoso que cuando todos los tiempos de estadía promedio eran iguales (e.g., comparando los valores de 297 vs. 337,27 para Z_{131}), pero aún así se mantiene que es la última preferencia para pacientes que llegan al hospital $h = 1$. Las decisiones aún no son proactivas dado que la AOP aún pondera todos los otros factores del hospital $h = 3$, como las tasas de llegada y las capacidades. Además, el hospital $h = 3$ aún es el más especializado en el grupo $g = 2$, por lo que sí se observa proactividad para esas transferencias ($Z_{132} < 0$ y $Z_{232} < 0$).

		Tiempo de estadía promedio para pacientes del grupo $g = 1$ en el hospital $h = 3$			
		11,9	12	12,1	12,2
Util. Impl.		100,66 %	100,85 %	101,04 %	101,23 %
Z_{hig}	Z_{121}	150,00	150,00	150,00	150,00
	Z_{131}	297,00	337,27	389,85	442,46
	Z_{141}	150,00	150,00	150,00	150,00
	⋮	⋮	⋮		⋮
	Z_{311}	3,00	–37,27	–89,85	–142,26
	Z_{321}	3,00	–37,27	–89,85	–142,26
	Z_{341}	3,00	–37,27	–89,85	–142,26
	⋮	⋮	⋮		⋮
	Z_{122}	49,51	49,51	49,51	49,51
	Z_{132}	–160,12	–166,91	–166,91	–166,91
	Z_{142}	–19,91	–19,91	–19,91	–19,91
	Z_{212}	250,49	250,49	250,49	250,49
	Z_{232}	–59,63	–66,42	–66,42	–66,42
	Z_{242}	80,58	80,58	80,58	80,58
Y_{hgp}	⋮	⋮	⋮		
	Y_{311}	168,00	127,73	75,15	22,74
	Y_{321}	3 918,99	3 925,78	3 925,78	3 925,78

Tabla D.4. Valores de algunos coeficientes Z_{hig} y Y_{hgp} ante variaciones en el largo de estadía promedio para los pacientes del grupo $g = 1$ en el hospital $h = 3$. La tercera fila muestra la utilización implícita global resultante para cada tiempo de estadía promedio.

Por el otro lado, cuando el hospital $h = 3$ es levemente menos especializado (i.e., tiene tiempos de estadía promedio más largos para los pacientes del grupo $g = 1$) que el resto de los hospitales (que mantienen el mismo tiempo de estadía promedio), la AOP ve más valor en transferir a los pacientes del grupo $g = 1$ a otros hospitales dado que una admisión directa es la peor acción posible desde la perspectiva de utilización de capacidad. Esto puede apreciarse en los valores negativos de Z_{311}, Z_{321} y Z_{341}. A medida que la especialización decrece, esta sugerencia se vuelve más fuerte.

Por último, para resumir, la AOP sugiere un orden de preferencia para las transferencias aún cuando se encuentra en una configuración en la que no hay (o hay muy poca)

diferencia de especialización entre hospitales. La política aún considera la especialización de los hospitales sobre los otros grupos, junto a sus tasas de llegada y capacidades.

E. ANEXO E: INSTRUCTIVO RESULTANTE DE LA POLÍTICA ÓPTIMA APROXIMADA

Este anexo busca enlistar la serie de pasos que se debe seguir, según la Política Óptima Aproximada (AOP) obtenida en la subsección 6.1.1, ante la llegada de un nuevo requerimiento de una cama crítica Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) en el Servicio de Salud Metropolitano Sur (SSMS). Recordemos que este requerimiento surge cuando el médico tratante y el equipo del hospital logran estabilizar al paciente y este se encuentra transferible, y se define la necesidad de hospitalización del paciente en una cama crítica.

1. Tener claro el diagnóstico principal del paciente, para poder categorizarlo de forma inmediata en alguno de los grupos descritos en la Tabla 6.1.
2. Proceder de acuerdo al caso según la siguiente lista. Hay que considerar que siempre se pasa a la siguiente opción del orden de preferencia si es que ninguno de los anteriores dispone de una cama crítica UCI libre para recibir al paciente en cuestión:
   a) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del sistema hepatobiliar y páncreas**; **enfermedades y trastornos del sistema musculoesquelético y tejido conectivo**; o **enfermedades y trastornos endocrinos, nutricionales y metabólicos**, entonces **independiente de dónde se levantó el requerimiento**, se debe transferir de acuerdo al siguiente orden de preferencia, independiente de dónde se levante el requerimiento: BL, SB, EP, Privado.
   b) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del sistema reproductor femenino**, entonces, independiente de dónde se levante el requerimiento, se debe transferir de acuerdo al siguiente orden de preferencia: EP, Privado. No considerar enviarlo al SB ni al BL.

c) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del riñón y vías urinarias**, o bien presenta **enfermedades y trastornos en el sistema reproductor masculino**, entonces, independiente de dónde se levante el requerimiento, se debe transferir de acuerdo al siguiente orden de preferencia: SB, EP, BL, Privado.

d) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del oído, nariz, boca y garganta**; **embarazo, parto y puerperio**; **enfermedades y trastornos de la sangre, del sistema hematopoyético y del sistema inmunitario**; **enfermedades infecciosas y parasitarias (sistémicas o afectación no especificada)**; **enfermedades o trastornos mentales**; **enfermedades y trastornos del ojo**; o bien **heridas, envenenamientos y efectos tóxicos de las drogas**; entonces, independiente de dónde se levante el requerimiento, se debe transferir directamente al sector privado[4].

e) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del sistema nervioso**, si:

1) El requerimiento se levantó en el hospital BL o en el hospital SB, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: SB, EP, BL, Privado.
2) El requerimiento se levantó en el hospital EP, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: EP, SB, BL, Privado.

f) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del sistema respiratorio**, si:

1) El requerimiento se levantó en el hospital BL o en el hospital SB, entonces se debe derivar directamente al Privado.
2) El requerimiento se levantó en el hospital EP, entonces se debe intentar internar ahí mismo. Si no existen camas disponibles, se debe derivar al Privado.

g) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del sistema digestivo**, si:

[4]Al más barato que tenga convenio GRD con la UGCC y que disponga de capacidad, o bien, en caso contrario, a algún otro privado no rankeado.

1) El requerimiento se levantó en el hospital BL o en el hospital EP, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: BL, SB, EP, Privado.
2) El requerimiento se levantó en el hospital SB, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: SB, BL, EP, Privado.

h) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos de la piel, del tejido subcutáneo y de la mama**, si:

1) El requerimiento se levantó en el hospital BL o en el hospital SB, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: SB, EP, BL, Privado.
2) El requerimiento se levantó en el hospital EP, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: EP, SB, BL, Privado.

i) Si el paciente presenta **enfermedades y trastornos del sistema circulatorio**, si:

1) El requerimiento se levantó en el hospital BL, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: Bl, EP, SB, Privado.
2) El requerimiento se levantó en el hospital EP o en el hospital SB, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: EP, BL, SB, Privado.

j) Si el paciente presenta **quemaduras**, si:

1) El requerimiento se levantó en el hospital BL, entonces se debe derivar directamente al Privado.
2) El requerimiento se levantó en el hospital EP o en el hospital SB, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: EP, Privado.

k) Si el paciente presenta una categoría **miscelánea o no tiene información agrupable**, independiente de a dónde se levantó el requerimiento, se debe seguir el siguiente orden de preferencia: SB, Privado.

l) Si el paciente requiere internación **por otros motivos**, entonces el orden de preferencia que se debe seguir para la transferencia es: BL, SB, EP, Privado.

3. Si el hospital de primera preferencia de acuerdo a la regla de decisión es el hospital en el que se encuentra el paciente, y este hospital cuenta con camas críticas para admitirlo, entonces se admite como regularmente se ha hecho hasta la fecha.
4. Si el hospital de primera preferencia de acuerdo a la regla de decisión no es el hospital en el que se encuentra el paciente, entonces se debe contactar a la UGCC para que indique el siguiente hospital del orden de preferencia que sí tenga camas disponibles para recibirlo.
5. Realizar contacto con el hospital al que derivar informando condiciones clínicas del paciente y oficializando la realización del traslado.
6. Finalmente, trasladar al paciente con la asistencia del Sistema de Atención Médica Móvil de Urgencia (SAMU) o entidad correspondiente, y se debe adjuntar al traslado la documentación correspondiente (e.g., informe médico digital, hoja de traslado, epicrisis de enfermería, exámenes realizados, medicamentos, entre otros).

F. ANEXO F: MODELOS DETERMINÍSTICOS PARA EL PROBLEMA DE TRANSFERENCIAS UCI

Este anexo busca presentar el modelo matemático realizado para determinar las acciones óptimas (y sus desempeños) si se hubiera sabido el futuro.

F.0.1. Índices

- $h, i \in \{1, \ldots, H\}$ asociado a los hospitales.
- $g \in \{1, \ldots, G\}$ asociado a los GRDs.
- $e \in \{1, \ldots, E\}$ asociado a las clínicas privadas.
- $p \in \{1, \ldots, P\}$ asociado a los pacientes.
- $t \in \{1, \ldots, T\} \equiv [T]$ asociado al período (día) de operación. Al compararlo con la simulación de la AOP o la política miope, el período $t = 1$ corresponde al primer período no transiente de las simulaciones.

F.0.2. Parámetros que son conjuntos

- $\mu_{ph} \subseteq [T]$: conjunto de períodos en que el paciente p requeriría ocupar cama si es atendido en el hospital h.

F.0.3. Parámetros

- γ: factor de descuento por período.
- ν_p^t: parámetro binario que indica 1 si el paciente p está esperando por su atención al inicio del período t.
- K_h: capacidad en camas UCI que tiene el hospital público h.
- η_{pg}: parámetro binario que indica 1 si el paciente p es del grupo g.
- β_{ph}: parámetro binario que indica 1 si el paciente p llegó al hospital h en primera instancia.

- IS_h^t: cantidad de camas ocupadas al inicio del período t por pacientes que estaban al inicio del horizonte en el hospital h.

F.0.4. Variables

- x_{ph}: variable binaria que vale 1 si el paciente p es atendido en el hospital público h.
- y_{pe}: variable binaria que vale 1 si el paciente p es atendido en la clínica privada p.
- z_{ph}^t: variable binaria que vale 1 si el paciente p se encuentra ocupando una cama del hospital h al inicio del período t, luego de transferir y derivar pacientes.

F.0.5. Función objetivo

$$\min \quad \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P}\left[\sum_{h=1}^{H}\sum_{g=1}^{G}\sum_{e=1}^{E} k_{hgp}\beta_{ph}\eta_{pg}y_{pe} + \sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{H}\sum_{g=1}^{G} f_{hig}\beta_{ph}\eta_{pg}x_{pi}\right]\nu_p^t \cdot \gamma^{t-1}$$

F.0.6. Restricciones

- Todo paciente debe ser atendido en algún recinto público o privado.

$$\sum_{h=1}^{H} x_{ph} + \sum_{e=1}^{E} y_{pe} = 1 \qquad \forall p$$

- Se debe respetar la capacidad de los hospitales.

$$IS_h^t + \sum_{p=1}^{P} z_{ph}^t \leq K_h \qquad \forall h, t$$

- Los instantes en que un paciente ocupará una cama en cierto hospital viene dado por su largo de estadía, definido en el conjunto μ_{hg}.

$$x_{ph} = z_{ph}^t \qquad \forall p, h, t : t \in \mu_{ph}$$

- Un paciente no puede estar ocupando una cama si es que no ha llegado.

$$z_{ph}^{t} = 0 \qquad \forall p, h, t : t \notin \mu_{ph}$$

- Se deben respetar las transferencias imposibles.

$$x_{pi}\beta_{ph}\eta_{pg} = 0 \qquad \forall p, h, i, g : (h, i, g) \in \mathcal{M}$$

- Naturaleza de las variables

$$x_{ph} \in \{0, 1\} \qquad \forall p, h$$

$$y_{pe} \in \{0, 1\} \qquad \forall p, e$$

$$z_{ph}^{t} \in \{0, 1\} \qquad \forall p, h, t$$