

Estudio de las necesidades de camas para patologías tumorales a nivel de Comunidades Autónomas

César Abraham Pacheco Vera

Resumen

La presente investigación aborda de manera exhaustiva y multidisciplinaria el desafío crítico de la **gestión eficiente de la asignación de pacientes a camas hospitalarias (PBA)** dentro del complejo y vital sistema de salud público español. La pertinencia de este estudio se subraya por una serie de factores convergentes que ejercen una presión constante sobre la infraestructura sanitaria: el inexorable envejecimiento de la población, el aumento en la prevalencia de enfermedades crónicas y de alta complejidad como el cáncer de pulmón, y las lecciones aprendidas de crisis sanitarias globales, como la pandemia de COVID-19. Esta última, en particular, puso de manifiesto de forma dramática la necesidad imperante de mantener un control riguroso sobre la ocupación hospitalaria y de disponer de una capacidad de reserva para situaciones de contingencia.

Específicamente, este trabajo se enfoca en pacientes diagnosticados con **cáncer de pulmón**, una patología que representa un desafío significativo para el sistema sanitario español, con una alta incidencia y lamentablemente, una considerable mortalidad. Datos recientes apuntan a que más de 30,670 nuevos casos y 23,129 fallecimientos anuales se estiman para esta enfermedad en 2023 en España. La criticidad de una asignación óptima se intensifica al considerar que, en promedio, más de 93 pacientes con esta patología ingresan diariamente en los hospitales españoles, lo que se traduce en más de 34,000 ingresos anuales. Estos pacientes requieren, de forma continua, una cama en una habitación para recibir el tratamiento necesario, lo que ejerce una presión constante sobre la disponibilidad de recursos. A esta complejidad clínica se suman factores sociales relevantes, como la creciente tendencia de hogares unipersonales en España, que añaden una capa adicional de consideración en la gestión de la atención y el soporte post-hospitalario, influyendo en la eficiencia global del sistema.

Para enfrentar esta problemática multifacética, el marco teórico y metodológico de este trabajo se asienta firmemente en la **Investigación Operativa (IO)**. La IO es una disciplina científica que utiliza métodos analíticos y técnicas de modelado para mejorar la toma de decisiones complejas en diversos ámbitos, desde la logística militar, donde nació durante la Segunda Guerra Mundial, hasta la gestión empresarial y, de forma crucial, la gestión sanitaria. Dentro de la IO, la **Programación Matemática** se erige como una herramienta fundamental, enfocándose en la optimización (maximizar o minimizar) de una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. Un tipo específico de programación matemática, la **Programación Entera (PE)**, es particularmente indispensable para el presente estudio. La PE permite modelar situaciones del mundo real donde las decisiones o los recursos son de naturaleza discreta, es decir, deben tomar valores enteros. Esto es crucial en el PBA, donde no se puede asignar "medio paciente.^a "media cama". La utilización de variables binarias (0 o 1) en la PE es ideal para representar decisiones de "sí/no" (por ejemplo, si un paciente es asignado o no a una cama específica), permitiendo así una representación fiel de la realidad hospitalaria y la gestión precisa de capacidades y conteos. La evolución histórica del PBA, desde enfoques determinísticos iniciales hasta modelos dinámicos, estocásticos y multiobjetivo actuales, resalta la pertinencia y madurez de las técnicas de IO para este problema.

El núcleo analítico de la investigación reside en la formulación detallada de un **modelo de optimización lineal entera** para el PBA. Este modelo ha sido meticulosamente diseñado para integrar una serie de factores críticos que influyen directamente en la asignación óptima de los pacientes. En su **función objetivo**, se ponderan cuidadosamente diversos criterios de beneficio y penalización. Entre los beneficios se incluye la asignación del paciente a un hospital dentro de su **provincia de residencia** (b_r), lo que reduce la carga para el paciente y sus familiares; la atención a la naturaleza del **diagnóstico de entrada** (b_o para ordinario

y b_u para urgente), reflejando la prioridad clínica; y el beneficio asociado al **fallecimiento de un paciente** (b_m), que, aunque una situación trágica, desde una perspectiva puramente operativa, libera un recurso hospitalario vital. Además, se considera un beneficio por asignar a un paciente que pertenece a un **hogar unifamiliar** (b_{uni}), reconociendo sus posibles necesidades de atención diferenciada. Complementariamente, el modelo impone penalizaciones por la **no asignación en la provincia de residencia** (b_{nr}) y por la **superación de la estancia media** de 9.95 días (b_e), incentivando la eficiencia en el uso de las camas. Las **restricciones** del modelo son robustas y garantizan la viabilidad de las soluciones: cada paciente debe ser asignado a una y solo una cama disponible; se debe respetar la capacidad máxima de camas en cada hospital o provincia; se establecen regulaciones sobre la cantidad y proporción de pacientes según su diagnóstico y origen de residencia en cada provincia; se controla la **saturación hospitalaria** mediante un umbral de ocupación máxima permitida del 90%; y se gestiona la proporción de pacientes de hogares unificamiliars asignados por provincia. La variable de decisión central es binaria, denotada como X_{ijp} , indicando si el paciente p de la provincia de residencia i es asignado a la provincia de hospitalización j .

La validación de la efectividad y eficiencia del modelo se realizó a través de un **análisis comparativo exhaustivo** basado en datos reales. Se utilizó una **extensa base de datos anonimizada** de 102,331 pacientes con cáncer de pulmón, que ingresaron en hospitales españoles entre el 1 de enero de 2017 y el 31 de diciembre de 2019. Esta base de datos, proporcionada por el FIDIS, es rica en información relevante como la provincia de residencia y hospitalización, el diagnóstico de entrada y principal, las fechas de ingreso y alta, la estancia del paciente y el motivo de alta. La preparación y el procesamiento inicial de estos datos se llevaron a cabo mediante códigos desarrollados en **lenguaje R**, mientras que la formulación del modelo de optimización y su resolución se implementaron en el lenguaje **AMPL**. Para la búsqueda de la solución óptima, se emplearon cuatro solvers comerciales de optimización de alto rendimiento, ampliamente reconocidos en la industria y la academia: **Gurobi Optimizer**, **IBM ILOG CPLEX Optimizer**, **BARON (Branch And Reduce Optimization Navigator)** y **OCTERACT Optimizer**. Estos solvers, con sus algoritmos avanzados (como símplex, punto interior, ramificación y acotación, y técnicas de pre-procesamiento), son capaces de abordar problemas de programación entera de gran escala.

Los experimentos se estructuraron en tres escenarios de demanda hospitalaria creciente, lo que permitió evaluar el rendimiento del modelo y los solvers bajo diversas condiciones operativas:

- **Caso I: Escenario de baja demanda hospitalaria (Comunidad Autónoma de Galicia):** Se simuló una situación de gestión diaria con 18 ingresos de pacientes con cáncer de pulmón. Los resultados fueron contundentes: todos los solvers (Gurobi, CPLEX, BARON, OCTERACT) alcanzaron la solución óptima en tiempos extremadamente reducidos, inferiores a 0.35 segundos. Gurobi y CPLEX demostraron una velocidad excepcional, con 0.03 y 0.01 segundos respectivamente, y un número mínimo de iteraciones. Esto subraya la alta eficiencia del modelo y su aplicabilidad inmediata en entornos locales con baja carga de pacientes.
- **Caso II: Escenario de alta demanda hospitalaria (Comunidad Autónoma de Cataluña):** Este escenario, más exigente, consideró un día con 79 ingresos de pacientes. El tamaño del modelo aumentó significativamente, involucrando 1896 variables y 112 restricciones. A pesar de este incremento en la complejidad, la robustez del modelo y la potencia de los solvers mantuvieron los tiempos de resolución por debajo del segundo para todos ellos. CPLEX se destacó con 0.06 segundos, mientras que Gurobi y BARON también fueron muy rápidos con 0.11 segundos. Esto es un indicador positivo de la escalabilidad del modelo a nivel regional, incluso en días de alta afluencia de ingresos.
- **Caso III: Administración global hospitalaria (Las 52 provincias de España):** Representando el mayor desafío computacional y la prueba de fuego para la aplicabilidad a gran escala, se analizó un día con 305 ingresos de pacientes distribuidos por todo el territorio nacional. Este caso generó un modelo de optimización masivo, con más de 670,000 variables binarias y 674 restricciones. A pesar de esta magnitud, Gurobi y CPLEX demostraron su superioridad, obteniendo la solución óptima en tiempos excepcionalmente cortos para esta escala (aproximadamente 2.7 y 2.2 segundos respectivamente). Aunque BARON y OCTERACT mostraron tiempos de resolución más elevados (26.8 y 14.7 segundos), su capacidad para resolver el problema y encontrar la solución óptima dentro de un límite de tiempo práctico (menos de un minuto, lejos de la hora límite) es un logro significativo. Este hallazgo es de vital importancia, ya que valida de forma concluyente la viabilidad del modelo para la toma de decisiones

estratégicas en tiempo real a escala nacional, un factor fundamental para la gestión eficaz del sistema hospitalario moderno.

En síntesis, la investigación ha demostrado de manera fehaciente la **viabilidad, robustez, consistencia y notable eficiencia computacional** del modelo de programación matemática propuesto para la asignación hospitalaria de pacientes con cáncer de pulmón en España. Los resultados confirman que, a pesar de la inherente complejidad de la problemática y el considerable volumen de datos involucrados, el modelo es prácticamente implementable en el entorno hospitalario. Ofrece una herramienta cuantitativa poderosa que puede transformar la gestión de camas y recursos, permitiendo una asignación más eficiente, la minimización de costes asociados a la no-proximidad o estancias prolongadas, y una mejora sustancial en la calidad de la atención al paciente al integrar no solo criterios operativos, sino también importantes consideraciones humanitarias y sociales como la proximidad de la residencia.

Finalmente, se proponen diversas **líneas futuras de investigación** para enriquecer y expandir el alcance de este trabajo. Estas incluyen la exploración de la integración de la incertidumbre en el modelo, por ejemplo, mediante técnicas de programación estocástica, para manejar variaciones impredecibles en la demanda o disponibilidad de recursos. Asimismo, se sugiere ampliar el alcance del modelo para abarcar múltiples tipos de patologías tumorales o incluso otras enfermedades crónicas, considerando la especificidad de los recursos y tratamientos necesarios para cada una. El desarrollo de una interfaz de usuario intuitiva que permita a los gestores hospitalarios interactuar fácilmente con el modelo y visualizar los resultados de manera clara sería un paso crucial para su implementación práctica. Se recomienda también un análisis de sensibilidad más profundo sobre los parámetros de beneficio y penalización para comprender mejor su impacto en la solución óptima. Por último, se podría considerar la incorporación de la preferencia del paciente en la asignación, siempre que los datos lo permitan y se aborde de manera éticamente responsable.