**Asignación de médicos domiciliarios para la empresa de atención médica ADOM en la ciudad de Bogotá**

Mariana Moscoso Bayona

Juan Camilo Bello Merlano

**Proyecto de grado para optar al título de pregrado en Ingeniería Industrial**

**Asesor de tesis:**

David Álvarez-Martínez

**Co-asesores:**

Daniel Sebastián Giraldo Herrera

Daniel Hernando Cuellar-Usaquén

**Universidad de Los Andes**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Industrial**

**Bogotá, Colombia**

**2023**

**Agradecimientos:** Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de nuestra tesis. Su valioso conocimiento y apoyo fueron fundamentales en cada etapa del proceso. Agradecemos especialmente a nuestro asesor y co-asesores de tesis por su compromiso y orientación. También extendemos nuestro agradecimiento a todos aquellos que colaboraron, incluyendo familiares y amigos, por hacer posible que este proyecto se materializara. Su participación fue fundamental para el éxito de nuestra investigación.

**Tabla de contenido**

[Resumen 1](#_Toc136882766)

[1. Introducción 2](#_Toc136882767)

[2. Funcionamiento Operativo Actual 3](#_Toc136882768)

[3. Descripción del Problema 6](#_Toc136882769)

[4. Revisión Bibliográfica 7](#_Toc136882770)

[5. Formulación Matemática 9](#_Toc136882771)

[5.1 Modelo lineal 11](#_Toc136882772)

[5.2 Modelo Heurístico 13](#_Toc136882773)

[6. Implementación y Resultados 22](#_Toc136882774)

[7. Conclusiones y Trabajos Futuros 28](#_Toc136882775)

[Referencias 30](#_Toc136882776)

# Resumen

En este trabajo se presenta una formulación heurística y de programación lineal para resolver el problema de agendamiento de médicos domiciliarios en la ciudad de Bogotá para la empresa ADOM. La empresa debe decidir que médico debe asignar a cada una de las solicitudes de servicio respetando los tiempos contratados por las entidades gestoras de salud, como Salud Total, Famisanar y Sura. Estas solicitudes pueden provenir de diversas fuentes, como EPS, aseguradoras, pólizas o medicina prepagada, dependiendo del paciente en cuestión. Además, se consideran las jornadas laborales de los médicos y otras restricciones operativas internas. El objetivo es lograr atender todas las solicitudes en el menor tiempo posible para brindar un mejor servicio pues este puede impactar directamente el bienestar de los pacientes y la capacidad de respuesta de la empresa.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del funcionamiento actual de la empresa, con el objetivo de comprender en su totalidad la operación y poder tomar decisiones informadas para su mejora. Se recopilaron estadísticas descriptivas del período operativo del 2022, lo cual proporcionó una visión detallada de la situación actual.

Posteriormente, se realizó una investigación en la literatura especializada, centrándose en el problema de programación de tripulaciones (*Crew Scheduling Problem*). Este problema resulta relevante para el contexto del agendamiento de médicos, ya que comparte la idea de asignar eficientemente a los miembros del equipo, incluyendo al personal médico, a las tareas considerando ventanas de tiempo.

A continuación, se procedió a caracterizar de manera los modelos desarrollados en este estudio, abordando todos los aspectos relevantes. También, se realizaron evaluaciones utilizando diferentes métricas para comparar los modelos entre sí y con la situación actual. Esto permite obtener un panorama claro de la eficacia y eficiencia de las soluciones propuestas. Como trabajo futuro se propone considerar la incertidumbre del problema por etapas, principalmente incorporarla en los tiempos de servicio y los tiempos de viaje entre servicios.

# Introducción

Las compañías de atención médica domiciliaria han adquirido un papel fundamental en los sistemas de salud, ya que contribuyen a descongestionar los centros de atención y mejoran el acceso para aquellos que residen en áreas periféricas o tienen dificultades de movilidad. A pesar de que se enfocan principalmente en la atención primaria, como la evaluación de síntomas, remisiones, cuidados y pruebas, este sector se ha fortalecido debido a diversos factores, entre ellos el impacto del brote de COVID-19, el crecimiento acelerado de la población de adultos mayores y la expectativa de un incremento en el acceso a servicios de salud (EMIS, 2022). Se ha vuelto aún más atractivo debido a la seguridad y comodidad que brinda al paciente al recibir atención en su propio hogar.

En Colombia, los esfuerzos por mejorar el sistema de salud han dado como resultado una cobertura del 99,6% de la población, lo que equivale a más de 49 millones de personas afiliadas (MinSalud, 2022). En la ciudad de Bogotá, específicamente, se estima que hay aproximadamente ocho millones de personas afiliadas a los diferentes regímenes de salud, lo que las convierte en potenciales usuarios de los servicios médicos a domicilio (MinSalud, 2023). ADOM es una de las empresas que proporciona servicios médicos a domicilio en toda la ciudad de Bogotá y será el enfoque principal de este artículo. El 95% de sus pacientes están afiliados a importantes entidades gestoras de salud, como Salud Total, Famisanar y Sura, ya sea a través de una EPS, aseguradora, póliza o medicina prepagada. La empresa comenzó sus operaciones en 1978 en Bogotá, siendo una de las primeras Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) en ofrecer atención médica domiciliaria en Colombia (ADOM, 2022). Esta trayectoria le ha permitido adquirir una sólida reputación y experiencia en el campo.

ADOM ofrece una amplia gama de servicios, que incluyen medicina general, medicina pediátrica, terapias, enfermería durante 12 horas y enfermería por eventos. Sin embargo, su enfoque operativo se centra en la gestión estratégica de los médicos que brindan atención en medicina general, dado que es el servicio más demandado. La empresa cuenta con dos centros de operaciones: su sede principal en el barrio La Castellana y una base en el sur, ubicada en el centro comercial Paseo Villa del Río. En estos centros los operarios se encargan del agendamiento de los médicos.

Con el fin de hacer frente a la creciente demanda, la empresa busca tomar decisiones óptimas en el menor tiempo posible para la programación de sus médicos, ya que esto afecta directamente la experiencia de los usuarios y su salud. Además, mejorar el nivel de servicio puede convertirse en una ventaja competitiva que permita a la empresa crecer en el mercado y obtener beneficios económicos. Bajo este contexto, se propone una formulación heurística y de programación lineal alternativa para lograr una asignación eficiente de los médicos y mejorar la eficiencia operativa de la empresa, teniendo en cuenta las reglas y restricciones de los recursos disponibles. El problema es complejo debido a su naturaleza dinámica, donde las decisiones deben tomarse en tiempo real y con múltiples consideraciones.

Este artículo está organizado por secciones. En la siguiente sección se presenta la caracterización del problema, que se compone de la operación actual de la empresa y de las características claves que serán consideradas dentro de la solución. La tercera sección ofrece una breve revisión bibliográfica que sitúa el problema dentro de un área de estudio específica. La cuarta sección describe los modelos desarrollados en este trabajo para abordar el problema. En la quinta sección se presentan los resultados obtenidos con los modelos y, finalmente, en la última sección se extraen conclusiones y se plantean ideas para futuras investigaciones.

# Funcionamiento Operativo Actual

Para comprender en detalle el funcionamiento de ADOM, a continuación, se presenta una revisión de su desempeño durante el año 2022 en el servicio de medicina general. El proceso de agendamiento de médicos comienza en el centro de operaciones principal, donde un equipo de entre siete y ocho operadoras se encarga de la recepción de solicitudes, mientras que tres operarias asumen esta responsabilidad durante la noche. Las operadoras, que deben tener conocimientos en enfermería, son responsables de atender los diversos canales de comunicación con las entidades intermediarias de los pacientes, como Google Drive, llamadas telefónicas, WhatsApp y CRM (Customer Relationship Management). Si bien la mayoría de las solicitudes se asignan directamente a ADOM, también existen canales abiertos para otras IPS domiciliarias, lo que significa que la asignación del servicio depende de la rapidez de respuesta.

La empresa cuenta con una amplia cartera de clientes, entidades públicas y privadas, de más de 40 entidades, las cuales tienen tiempos contratados de entre dos y tres horas. Esto implica que se tiene una ventana de tiempo para llegar donde la paciente una vez recibida la solicitud, de lo contrario, se estaría incumpliendo con el contrato. ADOM cuenta con una base fija de médicos, que experimentó una alta rotación en 2022 pero se mantuvo entre 40 y 50 profesionales. Además, contrata a cierta cantidad de médicos por prestación de servicios, algunos de los cuales pueden trabajar solo una hora por día a la semana. Para garantizar el desplazamiento seguro de los médicos, ADOM cuenta con una flota de 37 vehículos, 12 de los cuales son propios y 25 son contratados a un proveedor externo.

Cada médico comienza su turno en una de las sedes, donde recoge un maletín que llevará durante toda la jornada. El maletín contiene todos los suministros necesarios para su trabajo, como insumos, medicamentos, equipos médicos y una tablet para el registro de información de los pacientes y el seguimiento de los servicios. Las sedes funcionan como punto de encuentro entre los médicos y los conductores para iniciar sus labores. La empresa ha establecido diferentes franjas horarias que comienzan en distintos momentos del día. Durante estas franjas, se espera que cada médico cumpla una jornada laboral completa de ocho horas, de lunes a viernes, y trabaje un fin de semana cada 15 días. Los médicos están asignados a zonas específicas en Bogotá, 31 zonas establecidas por la empresa, las cuales se han definido con el objetivo de mantener distancias máximas de 20 minutos entre ellos y los pacientes.

A lo largo de la semana, los médicos rotan por las diferentes zonas, de modo que al inicio de sus turnos son enviados a atender a los pacientes de su zona asignada. En el caso de que un médico llegue a su turno y no tenga servicios asignados este igualmente se desplaza a su zona para esperar que se le asigne un paciente. Luego, la meta operativa es que cada médico realice entre nueve y diez consultas en su jornada laboral. Sin embargo, ADOM reconoce que, debido al agendamiento manual, la productividad de sus empleados se ve afectada y, por tanto, no siempre se cumple con el nivel de servicio deseado.

Es importante tener en cuenta que la operación real de la empresa en 2022 no cumplió con muchas de las restricciones y procesos mencionados anteriormente. A continuación, se presentan los detalles reales de la operación. Asimismo, se resalta que los resultados pueden no ser del todo correctos debido a un error común en el registro de los tiempos de inicio y fin de las atenciones. Los médicos a veces cometen errores al registrar en la tablet que comenzaron el servicio antes de haber llegado o registran el fin del servicio antes de tiempo. Por tanto, se tienen casos en los que el tiempo de servicio es de ocho minutos o incluso cero minutos.



Tabla 1. Estadísticos descriptivos del número de zonas visitadas por médico durante una jornada por día de la semana.

En un análisis preliminar del comportamiento de cada una de las zonas, se ha identificado que los médicos no están asignados exclusivamente a una sola zona, lo que indica que la restricción de asignación de zonas no se cumple en la práctica. Como se puede observar en la Tabla 1, en promedio los médicos visitan cuatro zonas durante un solo turno, pero esta cantidad puede llegar hasta diez zonas. Esto demuestra que la zonificación es una herramienta inicial para orientar a los operadores en la asignación de médicos, pero en realidad las asignaciones se realizan en función de la disponibilidad de tiempo de los médicos y su ubicación. La asignación de zonas será evaluada para definir si es una restricción que aporta a la toma de decisiones o no, ya que su cumplimiento no se da y podría limitar o complicar el modelamiento.



Gráfica 1. Promedio de solicitudes por hora y día de la semana en 2022: Análisis del historial completo de solicitudes recibidas por ADOM.

La demanda tiene un comportamiento particular dependiendo del día de la semana y la hora. Como se puede observar en la Gráfica 1 hay una tendencia similar en la cantidad de solicitudes a lo largo de los días de la semana, con ciertas variaciones. Durante los días laborables, lunes a viernes y en particular los lunes y martes, que la cantidad de solicitudes tiende a ser más alta en las primeras horas de la mañana, con un pico entre las ocho y diez de la mañana. Luego, se produce una disminución gradual a medida que avanza el día, con una ligera fluctuación en las horas de la tarde. Los sábados y domingos muestran un patrón diferente ya que las solicitudes son generalmente más bajas en comparación con los días laborables, y la distribución a lo largo del día tiende a ser más uniforme, sin un pico claro en ninguna hora específica. A lo largo de la semana la cantidad de solicitudes se mantiene relativamente baja durante las horas de la noche y madrugada.



Gráfica 2. Promedio de médicos en servicio por hora y día de la semana en 2022: Análisis del historial completo de solicitudes recibidas por ADOM.

La disponibilidad de médicos por hora y día de la semana, según se muestra en la Gráfica 2, está relacionada con el comportamiento de la demanda que se observa en la Gráfica 1. Por lo tanto, existe una correspondencia entre ambas. Sin embargo, al analizar en detalle el horario de las jornadas de los médicos, se observa lo siguiente. Por la mañana, cada hora entre las cinco y las once, se inicia una jornada de ocho horas con un número de médicos que varía entre uno y tres que se acumulan a la cantidad total de médicos. Durante las horas de la tarde, la cantidad de médicos que inician por turno disminuye gradualmente. Por la noche y madrugada, la disponibilidad de médicos es mínima. Al profundizar en los datos, se encontró que las horas trabajadas por cada médico por día no son equitativas. Algunos médicos trabajan dos turnos de ocho horas en un mismo día, con un descanso entre los turnos de menos de ocho horas, toman jornadas dobles o incluso llegan a trabajar hasta 18 horas continuas. Pero también hay casos en los que los médicos solo trabajan cuatro horas y no cumplen con su horario completo.



Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las horas trabajadas por los médicos en los diferentes días de la semana.

Luego, como hay médicos que trabajan por prestación de servicios y apoyan con una o dos horas de servicio por día, y la cantidad de días que trabajan al mes varía, estos datos se excluyen del análisis. Los resultados presentados en la Tabla 2 muestran claramente las dinámicas mencionadas, ya que, en promedio, los médicos trabajan menos de ocho horas, aunque existen algunos extremos. Se observa una alta desviación estándar, lo que demuestra una gran variabilidad en las horas trabajadas por los médicos. Es importante tener en cuenta esta información debido a sus implicaciones en la calidad de la atención médica. Se recomienda buscar un equilibrio entre las jornadas laborales de los médicos para garantizar su bienestar y la calidad de la atención brindada a los pacientes. Además, esto evita disparidades entre los médicos, ya que la carga de trabajo debe ser equitativa.



Tabla 3. Estadísticas descriptivas del nivel de servicio, cantidad de solicitudes atendidas por hora, por día de la semana.

Para continuar con el análisis de desempeño, se calculó el nivel de servicio considerando el tiempo trabajado por cada médico y el número de solicitudes que realizaron. En general los médicos atienden 1.13 personas por hora que está por debajo de las metas de la empresa que es 1.25 y 1.3 consultas por hora. Este nivel de servicio resulta en un tiempo promedio de espera 2.04 horas, sin embargo, hay casos en los que los pacientes deben esperar hasta nueve horas en ser atendidos.

# Descripción del Problema

ADOM necesita mejorar la manera en cómo toma las decisiones de agendar a sus médicos, pues esto puede significar captar una mayor cantidad de demanda y desarrollar propuestas de valor competitivas en el mercado. Este proyecto tiene la capacidad de añadir valor real para una empresa que actualmente opera en unos de los sectores más importantes para la humanidad. Es relevante buscar una herramienta que facilite el agendamiento de los médicos y lograr mejores resultados en tiempos, costos y niveles de servicio. Lograr la automatización del proceso de agendamiento mejorará la operación de la empresa, permitiéndola crecer y mantenerse conectada con innovaciones tecnológicas y de procesos, los cuales podrán ayudar a ADOM a captar una mayor participación en el mercado.

El desafío radica en que las operadoras deben tener la habilidad de realizar múltiples tareas al mismo tiempo para proporcionar una respuesta rápida en los diferentes canales de comunicación. Además, deben ser capaces de evaluar diferentes variables espaciales y temporales para considerar las diversas opciones de programación de los médicos. Esto implica desarrollar modelos de optimización para cumplir con los tiempos y niveles de servicio requeridos, los cuales no pueden ser resueltos en minutos por una sola persona. De acuerdo con lo anterior los modelos propuestos deben tener la capacidad de evaluar múltiples restricciones y garantizar mejoras operativas.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado las siguientes son las características y restricciones más importantes del problema y las cuales se tendrán en cuenta para el modelamiento:

1. Hay una base de médicos disponibles en diferentes franjas horarias, jornadas de ocho horas.
2. Cada médico es asignado a una zona dentro del área de cobertura.
3. Cada médico tiene a disposición un conductor que lo acompaña durante de toda la jornada.
4. La cantidad de médicos varía a lo largo del día y dependiendo del día de la semana.
5. Existe un tiempo de respuesta deseable para cada solicitud, puesto que cada entidad tiene un tiempo contratado asociado.
6. La demanda se ve afectada por el día de la semana y la hora.

Las características del problema coinciden con las de un problema de programación de tripulación (*Crew Scheduling Problem*) por tanto en la siguiente sección se hará una revisión bibliografía sobre el tema.

# Revisión Bibliográfica

La programación de tripulaciones (CSP) desempeña un papel crucial en diversas industrias como el transporte, la logística, los sectores de servicios y la atención médica. Asignar de manera eficiente a el personal de un servicio, incluido el personal médico, a las tareas teniendo en cuenta las ventanas de tiempo es un desafiante problema de optimización. Esta revisión bibliográfica tiene como objetivo proporcionar una visión general de los estudios realizados sobre modelos de programación de tripulaciones con y sin ventanas de tiempo, con un enfoque particular en la programación médica. Cabe resaltar que este trabajo se enfoca en el agendamiento y no en el ruteo de los vehículos que transportan a los médicos, más adelante en el trabajo se explicará cómo se tendrá en cuenta el tiempo de desplazamiento.

En la programación de tripulaciones con ventanas de tiempo, el objetivo es asignar al personal las tareas dentro de intervalos de tiempo especificados. Balakrishnan et al. (2002) propusieron un modelo de programación entera mixta para la programación de tripulaciones en el transporte en autobús, teniendo en cuenta las ventanas de tiempo, la disponibilidad de la tripulación y los requisitos mínimos de descanso. El modelo se resuelve utilizando un algoritmo de ramificación y acotación. El algoritmo de ramificación y acotación es un algoritmo de propósito general para resolver problemas de optimización. El algoritmo funciona dividiendo recursivamente el espacio de búsqueda en subproblemas cada vez más pequeños. El algoritmo termina cuando encuentra una solución que se garantiza que es óptima.

Las técnicas metaheurísticas se han adoptado ampliamente para resolver la complejidad computacional de la programación de tripulaciones con ventanas de tiempo. Muter et al. (2012) aplicaron un algoritmo genético para optimizar la programación del personal médico en hospitales, teniendo en cuenta diversas restricciones como las preferencias de turnos, el equilibrio de carga de trabajo y los requisitos de habilidades. Su estudio demostró la eficacia del algoritmo genético para generar horarios de alta calidad. El algoritmo genético es un algoritmo inspirado en el proceso de selección natural, este funciona creando y evaluando iterativamente una población de soluciones. Las mejores soluciones se utilizan luego para crear nuevas soluciones, y el proceso se repite hasta encontrar una solución satisfactoria.

En la programación de tripulaciones sin ventanas de tiempo, el enfoque se centra en asignar a las tripulaciones a las tareas sin restricciones estrictas de tiempo. Kuo et al. (2017) desarrollaron un modelo de programación matemática para la programación de enfermeras en hospitales, teniendo en cuenta las preferencias de turnos, la distribución de carga de trabajo y los criterios de equidad. El modelo tuvo como objetivo optimizar la utilización del personal y mejorar la satisfacción laboral. El problema implicaba programar a 100 enfermeras para trabajar turnos de 12 horas. Fue capaz de encontrar un horario que cumplía con todas las restricciones y tenía una aptitud del 98%. Esto significa que el horario era un 98% óptimo.

Otro ejemplo de CSP sin ventanas de tiempo es el estudio realizado por Beasley y Cao (1996) que propone un algoritmo de búsqueda en árbol para resolver el problema. El objetivo principal del artículo era establecer un problema genérico de CSP que pueda adaptarse a diferentes contextos y, a su vez, integrar un procedimiento de búsqueda en árbol para obtener una solución óptima. Los autores reformulan el problema utilizando programación lineal con variables enteras cero-uno y aplican una relajación lagrangiana (RL) para establecer un límite inferior del CSP. Sin embargo, descubren que la RL no produce soluciones factibles, por lo que deciden mejorarla mediante una optimización de subgradiente. Finalmente, incorporan un procedimiento de Búsqueda en Árbol, conocido como Branch and Bound, al modelo. Esta técnica permite explorar de manera eficiente el espacio de soluciones y encontrar la mejor solución posible.

En relación al contexto dinámico del problema se tienen investigaciones como la de Bowers et al. (2013). Los autores desarrollaron un marco de programación en tiempo real para los departamentos de emergencia, considerando las llegadas de las solicitudes, las categorías de triaje y la disponibilidad de recursos. El estudio enfatizó la importancia de estrategias de programación adaptables y receptivas para garantizar una entrega oportuna de atención médica. Los autores propusieron un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) utilizando el optimizador CPLEX. Ellos prueban el modelo con un conjunto de datos del mundo real de un departamento de emergencia en Bélgica. Los resultados muestran que el modelo MILP es capaz de encontrar soluciones de alta calidad para el problema de programación en tiempo real de equipos. Sin embargo, el modelo es computacionalmente costoso de resolver y no toma en cuenta las preferencias de pacientes (triaje).

Considerando todo lo mencionado previamente y de acuerdo con el problema que se pretende resolver, se puede observar que, en el caso del servicio de atención médica domiciliaria, existen múltiples aproximaciones para llegar a soluciones optimas. Se decide utilizar principalmente un modelo de optimización lineal y modelo heurístico que respeten las restricciones establecidas por la empresa que garanticen además que no sea computacionalmente costosa.

# Formulación Matemática

Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, mejorar las decisiones de agendamiento, se tomó la decisión de desarrollar dos modelos. El primero fue diseñado inicialmente como un punto de referencia para evaluar el rendimiento del segundo. Dadas las limitaciones del trabajo y considerando que en la operación real no se conocen las decisiones futuras, se optó por una estrategia miope que realiza las asignaciones por eventos. Cada modelo se rige por las mismas restricciones, pero con diferentes aproximaciones y niveles rigidez en su cumplimiento. Para la implementación final de ambos modelos se tuvo en cuenta lo siguiente:

**Jornadas laborales**:

Para recrear de manera precisa la situación actual de la empresa, se diseñaron jornadas laborales para los médicos, teniendo en cuenta la demanda recibida. Dado que el análisis se enfoca en la operación del 2022, la distribución de las jornadas laborales y la cantidad de médicos en actividad han cambiado. Por lo tanto, fue necesario estimar, en cada jornada la cantidad de médicos apropiada, a fin de diseñar jornadas laborales de ocho horas de trabajo. No existe una distribución estándar de las jornadas laborales, ya que la demanda varía según los días, requiriendo diferentes cantidades de médicos para satisfacerla. Por lo tanto, un buen desempeño del modelo depende en gran medida de una adecuada programación de los médicos.

**Distancias Haversianas**:

Por último, implementamos la geolocalización de las solicitudes en nuestra base de datos. Esto nos permitió utilizar las distancias haversianas, que son una medida más precisa de la distancia entre dos ubicaciones geográficas, ya que tienen en cuenta la curvatura de la Tierra. Se tiene en consideración que la empresa cuenta con la información de la última ubicación conocida de cada médico. Por lo tanto, al realizar las asignaciones, se parte del último paciente visitado por cada médico y se calcula la distancia haversiana para determinar el próximo paciente a atender.

Además, se asume que todos los médicos parten de la misma ubicación, que es la sede principal de ADOM. Esto simplifica el cálculo de las distancias y permite optimizar la asignación de médicos. Es importante mencionar que las distancias calculadas se consideran en términos de tiempo, en lugar de distancia en kilómetros. Para ello, se investigó y utilizó una velocidad promedio de desplazamiento en la ciudad de Bogotá, que es de aproximadamente 24.8 km/h (Cámara de comercio, 2022). Esta información ayuda a tener en cuenta el factor tiempo y mejorar la asignación de médicos teniendo en consideración la ubicación geográfica de las solicitudes.

**Regla de prioridad**:

Con el objetivo de equilibrar la carga laboral de los médicos y acercarnos a las decisiones internas de la empresa, se diseñó una regla de prioridad que permite darle un peso a cada médico para decidir quiénes son los mejores candidatos para agendar. Esta regla de prioridad tiene en cuenta dos factores principales. En primer lugar, se prioriza el tiempo que tardará cada médico en comenzar la atención de la solicitud , representado por . El objetivo es lograr tiempos de atención oportunos para garantizar una mejor experiencia. En segundo lugar, se busca equilibrar la carga de trabajo entre los médicos considerando la cantidad de solicitudes asignadas, . Los médicos con un peso menor serán los que tengan prioridad para ser asignados, ya que un peso menor indica un menor tiempo para atender la solicitud del paciente.

Luego de realizar múltiples pruebas de precalentamiento, se determinó asignar diferentes pesos a cada factor. Inicialmente, se asignó el mismo peso a ambos factores, es decir, 0.5 cada uno, para buscar un equilibrio entre ellos y se puso bajo prueba. A través de un proceso de evaluación y ajuste basado en los resultados obtenidos con cada prueba. Estas pruebas permitieron identificar la relación entre la cantidad de asignaciones de cada médico, su tiempo de ocupación y el desplazamiento necesario para atender una solicitud. Con base en los datos recopilados durante las pruebas, se determinó que ajustar los pesos de manera no uniforme, según la cantidad de asignaciones, era más efectivo para lograr un equilibrio y una asignación de prioridades más adecuada.

Está regla se puede expresar de la siguiente manera:

Donde:

Podemos observar un ejemplo para comprender cómo funciona internamente, supongamos que tenemos 13 médicos disponibles de quienes conocemos , y .



Tabla 4. Ejemplo del funcionamiento interno de la regla de prioridad.

Como se observa en la tabla 4, los médicos L, B y K tienen la misma cantidad de solicitudes agendadas. Sin embargo, debido a que el médico L tardará menos tiempo en comenzar a atender la solicitud, es él quien obtiene el menor peso. Además, los médicos L, E y M tardarán el mismo tiempo en comenzar a atender la solicitud, pero dado que el médico L tiene la menor cantidad de solicitudes agendadas, es él quien obtiene el menor peso. Un caso interesante es el del médico F, ya que ocupa el tercer lugar en prioridad a pesar de tener una alta cantidad de solicitudes agendadas, esto se debe a que sería el que requeriría menos tiempo para atender la solicitud. Sin embargo, como el objetivo es balancear la carga de trabajo entre los médicos, los médicos L y B obtienen un menor peso.

## Modelo lineal

Se propone el modelo de optimización lineal con el fin de establecer un punto de comparación y una segunda alternativa en relación a la heurística que se presenta más adelante. Teniendo en cuenta la operación actual de la empresa, la asignación se debe realizar inmediatamente después de recibir la solicitud para poder informar al paciente qué médico lo atenderá. Además, dado que no se realizan reagendamientos de médicos para los fines de este trabajo, el modelo se ejecuta cada vez que se recibe una solicitud. En otras palabras, el objetivo de este modelo es tomar la mejor decisión después de cada evento, en este caso, tras la recepción de una solicitud.

Inicialmente para ejecutar el modelo proporciona toda la información disponible de la instancia.

* 1. **Conjuntos**
  2. **Parámetros**

Parámetros asociados a los médicos



Parámetros asociados a las solicitudes

Luego como se quiere iterar sobre las solicitudes en orden de minuto de llegada, es decir que se recorre el conjunto  en orden de menor a mayor , **se corre el siguiente modelo cada vez que llega una solicitud .**

* 1. **Parámetros complementarios**

A continuación se presenta el peso de prioridad que obtiene cada médico al evaluar su posible asignación respecto a la solicitud que se está evaluando. Esta definición se ajusta a los parámetros definidos para este modelo, pero sigue la misma lógica presentada anteriormente.

* 1. **Variable de decisión**

Variable binaria que define si se asignó o no la solicitud de servicio al médico .

* 1. **Restricciones**
     1. Naturaleza de las variables.
     2. No se debe exceder el tiempo contratado por las entidades.
     3. No se puede asignar una solicitud a un médico por fuera de su jornada laboral.

* + 1. Restringir que a cada solicitud se le asigne un único médico.
  1. **Función objetivo**

Lo que se busca es atender todas las solicitudes en el menor tiempo posible, garantizando que el trabajo esté balanceado y que se cumplen los tiempos. Es decir que se busca minimizar el peso de prioridad, que internamente tiene en cuenta el tiempo que se va a tardar cada médico en atender la solicitud y la cantidad de solicitudes asignadas.

* 1. **Actualización de parámetros**

Se debe actualizar la información del médico a quien fue asignado el servicio.

## Modelo Heurístico

La implementación heurística para la asignación de médicos domiciliarios se desarrolló a través de un proceso iterativo de construcción del modelo. Se partió de una estructura básica del problema y se avanzó hacia una representación más cercana a la realidad, que tuviera en cuenta las acciones tomadas en la operación diaria. En total, se realizaron cuatro iteraciones para mostrar el proceso de construcción de la heurística final.

El objetivo principal fue diseñar una heurística completa que capturara de manera exhaustiva la operación de la empresa. Para lograr esto se establecieron ciertas premisas que el modelo debía contemplar. Estas premisas se definen a continuación:

1. Asignación obligatoria: Cada paciente debe ser asignado a un médico domiciliario
2. Disponibilidad de médicos: Se establece que solo se considerarán los médicos disponibles cuyo horario de trabajo se encuentre dentro del rango de inicio y fin de jornada.
3. Prioridad de asignación: Se asigna prioridad a los médicos en función de ciertos criterios, como el número de solicitudes previamente atendidas, la distancia y el último minuto ocupado. Esta prioridad influye en la selección del médico más adecuado para la asignación.
4. Tiempos de servicio: Se deben tener en cuenta los tiempos contratados por las entidades de salud, de tal forma que se priorice una atención dentro de la ventana contratada.

Es de importancia resaltar que durante la construcción y validación de las iteraciones, se trabajó con una instancia representativa de un día específico (02/06/2022). Esta instancia incluye información como la cantidad de médicos disponibles, las solicitudes de los clientes, las zonas y direcciones de atención, así como la duración y la llegada de las solicitudes, las cuales suman un total de 306 solicitudes que deberán ser atendidos. En la Ilustración 1 se muestra un mapa de calor para representar la distribución de las solicitudes para la instancia escogida, ilustrando una mayor cantidad de solicitudes provenientes del norte de la ciudad, como también se puede apreciar la cobertura que tiene la empresa.

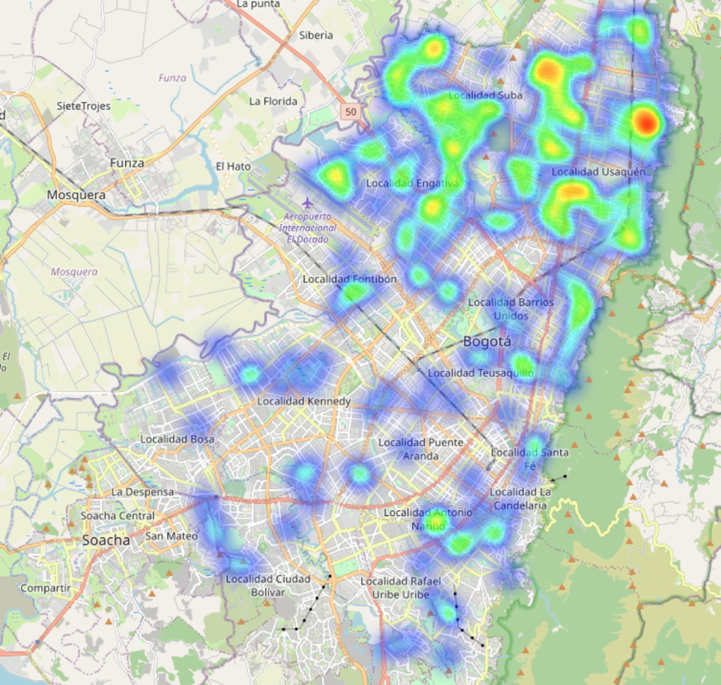


Ilustración 1. Mapa de calor de las solicitudes para el 02/06/2022

A continuación, se resumen los cuatro modelos iterados que formaron parte del proceso de desarrollo de la heurística final:

**Modelo 1. “First in first out” (FIFO)**

En este modelo inicial, se implementa una asignación básica de médicos domiciliarios. Las solicitudes de los pacientes son asignados en orden de lista, teniendo en cuenta que, si no hay ningún médico disponible, se asigna al médico cuya visita actual este más próxima a finalizar. Esta premisa constituye el punto de partida para el desarrollo de la heurística.

En primer lugar, se recorre una lista de médicos y se verifica si el minuto actual es mayor al último minuto ocupado por el médico. Si se cumple esta condición, se establece la disponibilidad del médico como "disponible". A continuación, se realiza otro recorrido por la lista de médicos y se verifica si el médico está disponible. Si es así, se asigna ese médico al paciente, se actualiza el último minuto ocupado por el médico y se finaliza el ciclo. Si ningún médico ha sido asignado en el paso anterior, se crea una lista de médicos ordenados por el fin de la solicitud en atención. Luego, se asigna el médico que logre atender más rápido al paciente. Se actualiza el último minuto ocupado por el médico y se finaliza el ciclo. Después, se realiza un último recorrido por la lista de médicos para verificar si el minuto actual es igual al último minuto ocupado por el médico. En caso afirmativo, se establece la disponibilidad del médico como "disponible". Finalmente, se agrega el estado de disponibilidad de los médicos al estado global de los médicos.

A picture containing text, letter, screenshot, font

Description automatically generated

Con respecto a la eficiencia del algoritmo se destaca como ADOM utiliza plantillas en Google Drive que desempeñan varias funciones, como servir como canal de recepción de clientes, asignación de médicos para referencia interna y registro histórico. Estas plantillas se actualizan en tiempo real y constituyen el medio a través del cual se comunica el estado de los médicos durante el día. Sin embargo, durante esta aproximación inicial se identificaron ineficiencias en la gestión de los datos. Era necesario actualizar constantemente las plantillas de Excel iteración tras iteración para reflejar la situación actual, incidiendo en el desempeño computacional del modelo. Por lo tanto, en la implementación será relevante encontrar métodos más efectivos para el manejo interno de la información contemplando el desarrollo de herramientas digitales que integren el modelo escogido con la operación.

**Modelo 2. Asignación por zona**

En este segundo modelo, se introduce el concepto de zonas tanto para los solicitudes como para los médicos. La asignación de médicos se realiza de forma arbitraria según las zonas. Es importante tener en cuenta que esta elección arbitraria podría tener un impacto significativo en los resultados. Si no hay médicos disponibles en una zona específica, se asigna cualquier médico disponible en cualquier zona (siguiendo el orden de la lista). Cuando un médico está disponible en la zona del paciente, se le asigna prioridad, siempre y cuando no este ocupado. En caso de que este ocupado, se espera hasta que este esté disponible.

A picture containing text, letter, font, receipt

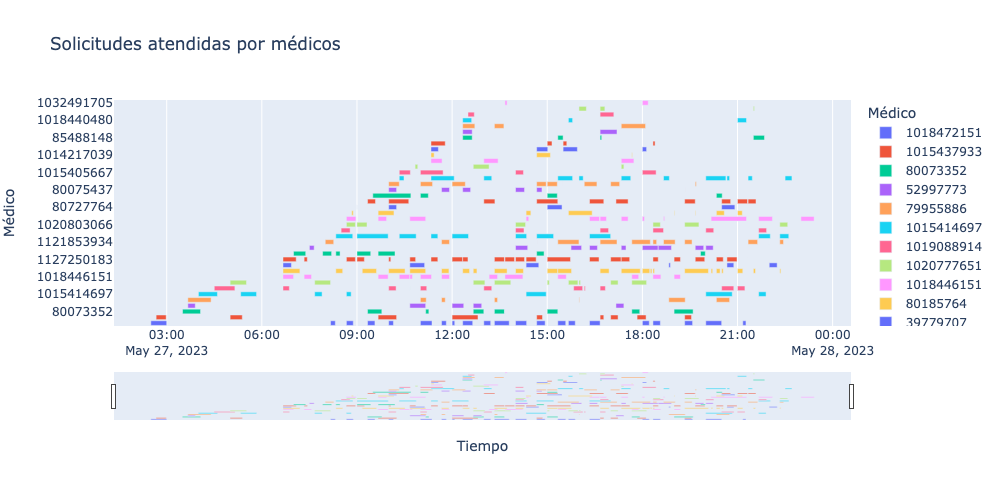
Description automatically generated

El procedimiento "AsignarMédico" en el segundo algoritmo tiene en consideración la disponibilidad de los médicos, la zona del paciente, el minuto actual, el estado de los médicos, una variable donde se guarda la asignación realizada y un identificador del servicio. En primer lugar, se verifica si el médico en el minuto del evento se encuentra ocupado, de no estarlo se actualiza su estado a disponible. Luego, se crea una lista con los médicos que se encuentran en la misma zona del paciente. Si hay médicos en esa zona, se recorre la lista y se asigna al paciente al primer médico disponible. Se actualiza el estado del médico y se guarda la información de la solicitud. Si ningún médico en la zona está disponible, se crea una lista de médicos ordenados por el fin de la solicitud en atención y se realiza la asignación correspondiente. En caso de que no haya médicos en la zona del paciente, se recorre la lista de todos los médicos y se asigna al paciente al primer médico disponible. Si no hay médicos disponibles, se asigna el que finaliza su solicitud actual más rápido. Se actualiza el estado del médico y se guarda la información de la solicitud. Posteriormente, se verifica si el minuto actual coincide con el último minuto ocupado por algún médico. En caso afirmativo, se establece la disponibilidad del médico como "disponible". Finalmente, se actualiza el estado de cada médico según su disponibilidad y se agrega al estado global de los médicos.

Los resultados de este modelo son representados mediante el uso de un diagrama de Gantt, específicamente el Diagrama de Gantt de la gráfica 3, con el objetivo de visualizar la asignación de los médicos a las solicitudes de los pacientes y analizar la distribución a lo largo del día. Esta representación gráfica resultó invaluable para identificar áreas de mejora en el algoritmo y optimizar la asignación de los médicos.

En el diagrama se puede analizar una correlación entre la distribución de las asignaciones de los médicos y la distribución promedio de las solicitudes por día y hora. Se observa un aumento progresivo en las asignaciones a medida que se acercan las horas con mayor demanda identificadas en la Gráfica 1, sugiriendo que la relación entre la demanda de los pacientes y la asignación de los médicos está presente.

De igual forma, se calculan indicadores básicos del modelo encontrando que, en promedio, cada médico atiende a 7.8 pacientes, encontrándonos por fuera de la situación deseada por la empresa. También, se calculó una desviación estándar de las solicitudes atendidas de 5.6 , lo cual revela una asignación desbalanceada de los médicos. Estos datos resaltan la necesidad de optimizar la distribución de los médicos a lo largo del día y ajustar la asignación para lograr una mayor equidad y eficiencia en el proceso.



Gráfica 3. Diagrama de Gantt para la asignación de médicos a las solicitudes del día 02/06/2022 para el modelo 2

**Modelo 3. Tiempos contratados**

En este tercer modelo, se tiene en cuenta los tiempos contratados por cada cliente, es decir, se establece un tiempo límite para la atención de cada tipo de cliente. Si el médico evaluado no cumple con estas condiciones, no es asignado al paciente. Además, se agregan tiempos de desplazamiento para cada médico. Cuando el médico se encuentra dentro de su zona asignada, el tiempo de desplazamiento es de 20 minutos; cuando se encuentra fuera de su zona, el tiempo se duplica. Igualmente, se tiene en cuenta la reasignación de la zona de los médicos cuando atendían a pacientes en otras zonas.

El procedimiento "AsignarMédico" en el tercer algoritmo tiene en consideración las mismas variables de disponibilidad de los médicos, la zona del paciente, el minuto actual, el estado de los médicos, una variable donde se guarda la asignación realizada, un identificador del servicio y ahora el tipo de cliente.

En primer lugar, se verifica si el minuto actual es mayor que cero. Si es así, se recorre una lista de médicos y se establece la disponibilidad de aquellos cuyo último minuto ocupado sea menor o igual al minuto actual. Además, se establece el último minuto ocupado como cero.

Luego se crea una lista de los médicos que se encuentran en la misma zona del paciente. Si hay médicos en esa zona, se recorre la lista y se verifica la disponibilidad de cada médico. Se estima un tiempo de llegada para cada médico y se agrega a una posible asignación. Si el tiempo estimado de llegada es menor o igual al tiempo de servicio del cliente, se asigna el médico al paciente, se actualiza su disponibilidad y último minuto ocupado, y se guarda la información de la solicitud.

En caso contrario, se crea una lista de médicos fuera de la zona ordenados por el fin de la solicitud en atención y se recorre en busca de un médico disponible. Se estiman los tiempos de llegada para cada médico y se agregan a la posible asignación. Si se encuentra un médico cuyo tiempo estimado de llegada sea menor o igual al tiempo de servicio del cliente, se reasigna la zona al médico y se realizan las actualizaciones correspondientes.

Si no se encuentra ningún médico disponible que cumpla con esta condición, se selecciona el médico con el menor tiempo estimado de llegada y se realizan las actualizaciones correspondientes. Si no hay médicos disponibles en la zona del paciente, se busca el primer médico disponible fuera de la zona. Se estiman los tiempos de llegada para estos médicos y se selecciona la posible asignación con los médicos cuyo tiempo de traslado es menor al tiempo estimado de llegada de los médicos en la zona. Se reasigna la zona al médico con el menor tiempo estimado de llegada y se realizan las actualizaciones correspondientes.

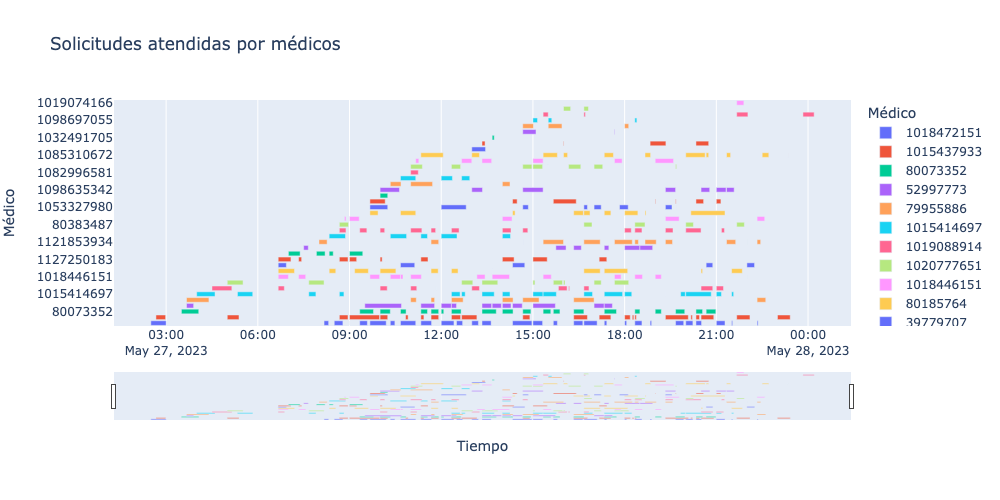
En caso de que no haya médicos disponibles en la zona del paciente ni fuera de ella, se realiza la asignación al primer médico disponible. Se actualiza su disponibilidad y último minuto ocupado, y se guarda la información de la solicitud. Finalmente, se verifica si el minuto actual coincide con el último minuto ocupado por algún médico. En caso afirmativo, se establece la disponibilidad del médico como "disponible".

A picture containing text, document, receipt, letter

Description automatically generated

Se evidencia que al tener la misma cantidad de pacientes y médicos el promedio de pacientes atendidos por médico es el mismo valor de 7.8 pacientes por día. Sin embargo, se observa un cambio en la desviación estándar que es significativamente mayor, alcanzando un valor de 6.3, lo cual indica una asignación aún más desigual en comparación con el modelo anterior, frente a estos indicadores se establece la necesidad de diseñar la regla de prioridad mencionada al inicio de esta sección con el fin de lograr disminuir la brecha de solicitudes atendidas por cada médico.

Estos descubrimientos son evidentes en la cantidad de solicitudes atendidas por los médicos que se encuentran en la parte inferior del diagrama de Gantt en la gráfica 4 en contraste con aquellos ubicados en la parte superior. Estos resultados confirman la falta de equidad en la asignación de pacientes y resaltan las limitaciones del algoritmo al considerar los tiempos de atención de los clientes.



Gráfica 4. Diagrama de Gantt para la asignación de médicos a las solicitudes del día 02/06/2022 para el modelo 3

Durante esta iteración, se identifica una ineficiencia en la zonificación utilizada anteriormente en la operación de la empresa. Se analiza que se realizan saltos frecuentes entre zonas, lo cual genera una falta de eficiencia. Por lo tanto, se toma la decisión de eliminar la zonificación del modelo y trabajar únicamente con las distancias entre ubicaciones.

Este cambio en el enfoque permite simplificar y mejor el proceso de asignación de médicos domiciliarios, ya que se basa en la distancia geográfica en lugar de depender de una zonificación que no está brindando resultados óptimos.

**Modelo 4. Heurística completa asignación de médicos domiciliarios**

El último modelo implementado corresponde a la versión completa de la heurística para la asignación de médicos domiciliarios. Esta versión final incorpora todas las mejoras y consideraciones de los modelos anteriores, buscando alcanzar una solución integral que tome en cuenta los aspectos relevantes del problema y optimice eficientemente la asignación de médicos.

Cada iteración del modelo representa un avance en la construcción de la heurística final y contribuye a mejorar la calidad de las asignaciones de médicos domiciliarios. La evolución a lo largo de las iteraciones refleja el proceso de refinamiento y ajuste de la heurística, permitiendo adaptarla a la realidad operativa de la empresa y mejorar su rendimiento en la asignación de recursos médicos.

Ahora bien, al analizar en detalle el modelo heurístico final, se logra integrar las premisas planteadas inicialmente teniendo en cuenta las jornadas laborales, las distancias haversianas y la regla de prioridad.

**Estructura heurística**

La heurística diseñada sigue la siguiente estructura para asignar médicos a las solicitudes:

1. Al recibir una nueva solicitud, se actualiza el estado de los médicos para verificar si hay médicos que han terminado su turno. Se buscan inicialmente aquellos médicos que están en su jornada laboral y disponibles, y se agregan a la lista de posibles asignaciones.
2. Si la lista de posibles asignaciones está vacía, se buscan médicos que estén en su jornada laboral y se calcula su peso de prioridad utilizando la regla de prioridad descrita anteriormente. Se verifica si hay médicos que cumplan con el tiempo de servicio requerido por el cliente, es decir, el tiempo en el que el médico puede llegar al cliente debe ser menor al tiempo acordado con las entidades de salud.

* Si hay médicos que cumplen con el tiempo de servicio, se selecciona al médico con el menor peso de prioridad como el más adecuado para la asignación. Se actualiza su estado y se registra la atención (Asignación tipo 1).
* Si no hay médicos que cumplan con el tiempo de servicio, se asigna al médico dentro de la jornada laboral que pueda atender el servicio lo más rápido posible (Asignación tipo 2).

1. Por otro lado, si en la lista inicial de posibles asignaciones hay uno o más médicos, se revisa si pueden atender la solicitud dentro del tiempo de servicio acordado. Si es posible, se asigna al médico con el menor peso de prioridad (Asignación tipo 3). Si no es posible, se asigna al médico que pueda atender la solicitud más rápidamente (Asignación tipo 4).

Los tipos de asignación se definen de la siguiente manera:

Tipo 1: El médico se encuentra en su jornada laboral, cumple con el tiempo de servicio, pero no está disponible. Se asigna en función de la regla de prioridad.

Tipo 2: El médico se encuentra en su jornada laboral, pero no cumple con el tiempo de servicio y no está disponible. Se asigna porque puede atender la solicitud lo más rápido posible.

Tipo 3: El médico se encuentra disponible, en su jornada laboral y cumple con el tiempo de servicio. Se asigna en función de la regla de prioridad.

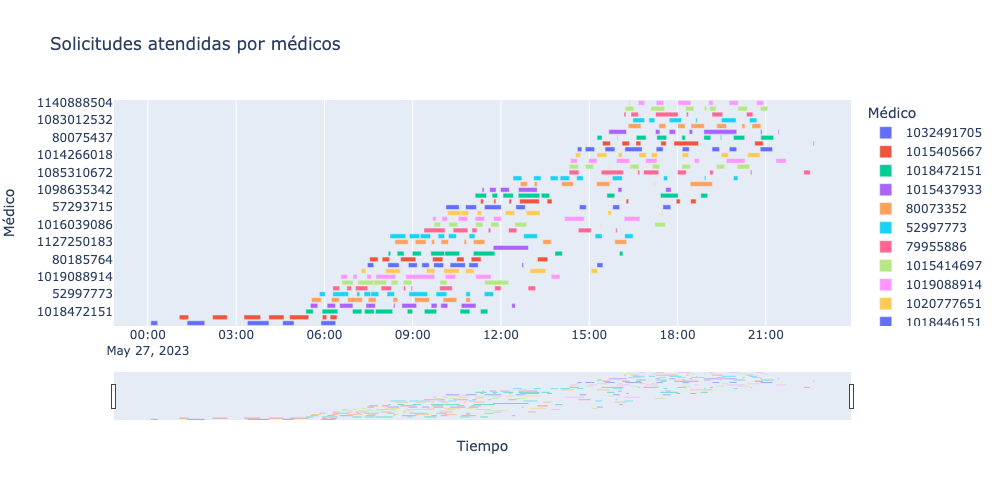
Tipo 4: El médico se encuentra disponible y en su jornada laboral, pero no cumple con el tiempo de servicio. Se asigna porque puede atender la solicitud lo más rápido posible.

A picture containing text, letter, paper, font

Description automatically generated

Se realizaron análisis de los indicadores básicos de la heurística diseñada y se encontraron mejoras significativas. La cantidad promedio de solicitudes atendidas por médico se mantuvo en 7.8, lo cual indica un nivel de eficiencia constante en la asignación de tareas. Además, la desviación estándar de las solicitudes atendidas disminuyó drásticamente a 1.6, lo que indica una distribución más equitativa del trabajo entre los médicos que operan durante el día.

Al examinar el diagrama de Gantt correspondiente en la gráfica 5, se puede apreciar una representación más compacta de las asignaciones, lo cual refleja una mejor organización de las jornadas laborales de los médicos. Esta mejora en la visualización y distribución del trabajo en el tiempo demuestra que se ha logrado optimizar la asignación de recursos médicos de manera más eficiente y efectiva.



Gráfica 5. Diagrama de Gantt para la asignación de médicos a las solicitudes del día 02/06/2022 para el modelo final.

# Implementación y Resultados

Para evaluar la eficiencia de los modelos, se utilizó una base de datos correspondiente a la operación de la empresa durante el año 2022. Esta base de datos contenía información detallada sobre cada solicitud, incluyendo fechas, horas, tipos de consulta, entidades contratantes, direcciones de los pacientes y médicos asignados.

Al implementar los modelos, se seleccionó una instancia de una semana teniendo en cuenta el análisis de la demanda de la sección 2, cada día modelado de forma independiente. Sin embargo, antes de la implementación, fue necesario realizar un tratamiento de los datos, la base de datos original contenía 124,282 solicitudes y para facilitar los cálculos la temporalidad se ajustó a minutos en todas las instancias y en el resto de la implementación. También se calcularon nuevas variables importantes, como la duración de la atención médica y las coordenadas geográficas de las direcciones. Para obtener estas coordenadas, se desarrolló un código utilizando la API de Bing para geolocalizar las direcciones en la base de datos. Esta información fue crucial para calcular las distancias haversianas entre los puntos y también nos permite explorar nuevas alternativas, como la asignación basada en algoritmos de ruteo.

Se escogió como instancia la semana correspondiente al 30/05/2022 al 05/06/2022 para evaluar los modelos creados, esta fue modificada para representar la operación diaria de la empresa. Con el fin de garantizar el cumplimiento del tiempo de servicio acordado con las entidades de salud se filtraron aquellas solicitudes que no fueron solicitadas y atendidas en el mismo día. Adicionalmente, se identificaron casos atípicos en los que la duración de la solicitud era inusualmente corta. Estos casos fueron corregidos reemplazando los valores atípicos por la media de la duración de las solicitudes.

Cabe destacar que la distribución de los médicos varía en cada día, ya que no se tenía información sobre sus jornadas laborales. Por lo tanto, diseñamos jornadas laborales determinando la cantidad de médicos en cada una en función de la demanda del día. El objetivo era lograr que los médicos atendieran de manera equitativa, en promedio, el mismo número de solicitudes a lo largo de las jornadas. Es crucial considerar que el rendimiento de nuestros enfoques está estrechamente ligado a una asignación eficiente de los médicos a sus respectivas jornadas.

Estos ajustes y consideraciones fueron fundamentales para el desarrollo y evaluación de los modelos, asegurando una representación precisa de la operación de la empresa y permitiendo la optimización en la asignación de médicos.

Para comparar la situación actual, la heurística para la asignación de médicos y el modelo de optimización con estrategia miope, se crearon los siguientes indicadores:

1. Tiempo de desplazamiento: Representa la suma del tiempo de los trayectos recorridos por los médicos al desplazarse entre las ubicaciones.
2. Cantidad de solicitudes promedio por médico: Indica el número promedio de solicitudes atendidas por cada médico. Es una medida de la carga de trabajo distribuida entre los médicos.
3. Tiempo promedio trabajado por médico: Mide el tiempo promedio en el que cada médico está atendiendo a un paciente o en desplazamiento hacia él.
4. Tiempo de ocio promedio por médico: Indica el tiempo en el que médico no está realizando ninguna consulta o traslado, es decir, el tiempo en el que se encuentra disponible pero no trabajando.
5. Tiempo de espera promedio por cada médico: Hace referencia al tiempo que los pacientes de cada médico esperan desde que realizan la solicitud hasta que llega el médico a atenderlos.
6. Cantidad de solicitudes demoradas: Son todas aquellas solicitudes que se demoraron más del tiempo contratado por lo proveedores de salud, que generalmente son tres horas.
7. Tiempo de demora: Es el tiempo adicional en el que el médico excede el tiempo contratado para atender a una solicitud.
8. Tiempo en servicio: Representa el tiempo transcurrido desde que un médico comienza su jornada hasta que atiende a su último paciente.
9. Tiempo extra: Mide la cantidad de tiempo que un médico permanece trabajando después de finalizar su jornada laboral.
10. Cantidad de solicitudes por hora: Indica la cantidad de solicitudes atendidas por cada médico en promedio durante una hora.
11. Total de solicitudes: Representa el número total de solicitudes atendidas durante el período analizado.
12. Desviación estándar de las solicitudes atendidas: Mide la variabilidad o dispersión de la cantidad de solicitudes atendidas por los médicos. Una desviación estándar más alta indica una distribución menos uniforme de las solicitudes.
13. Tiempo de espera promedio: Mide el tiempo promedio que un paciente debe esperar al médico desde que se realiza la solicitud hasta que es atendido para cada médico.

La primera simulación se corresponde con la distribución de médicos actual del día correspondiente, se destaca que se realiza un análisis de los indicadores con un mayor efecto en la simulación y los demás se pueden encontrar en el repositorio del proyecto.

En primer lugar se evidencia en la Gráfica 6 como la heurística tiene notablemente un mayor tiempo de desplazamiento promedio para sus médicos llegando a tener hasta un 43% más tiempo en transporte que la situación actual. Esto nos indica como la asignación actual está logrando minimizar las distancias desplazadas, sin embargo, más adelante analizaremos el costo de esta asignación, debido a que por la zonificación de la empresa los trayectos que deben realizar los médicos son más cortos, pero las asignaciones son menos eficientes. Adicionalmente, se destaca como el modelo de optimización logra asumir tiempos de desplazamientos similares a la situación actual.



Gráfica 6. Tiempo de desplazamiento promedio por médico en los días de la semana

Por otro lado, analizando los tiempos trabajados en la Gráfica 7, se observa como el optimizador destaca ante la situación actual y la heurística logrando que los médicos pasen la mayor parte de su jornada laboral trabajando. Este resultado es inversamente proporcional al tiempo de ocio de los médicos.



Gráfica 7. Tiempo trabajado promedio por médico en los días de la semana

Otro indicador que destaca en la simulación son los tiempos de espera promedio, representados en la Gráfica 8, los pacientes actualmente deben esperar hasta aproximadamente tres horas en promedio para ser atendidos, mientras que en los modelos diseñados, se logra atender a los pacientes en tiempos menores a una hora. Se destaca también, que el tiempo contratado en la gran mayoría de los casos siempre es respetado por nuestros modelos, mientras que existen en promedio 79 solicitudes que son atendidas después del tiempo contratado actualmente.



Gráfica 8. Tiempo de espera promedio por médico en los días de la semana

Por último, se presenta un análisis de la distribución actual del trabajo, reflejada en la Gráfica 9, donde se muestra la desviación estándar de las solicitudes atendidas por cada médico, logrando comprender que en la situación actual existen médicos que atienden muchas más solicitudes que otros, mientras que usando los modelos es posible distribuir de forma más equitativa el trabajo logrando tener desviaciones estándar promedio de 1.4.



Gráfica 9. Desviación estándar de las solicitudes atendidas por médico en los días de la semana

De forma completa, para la primera simulación realizada aunque la situación actual destaca en minimizar el tiempo de desplazamiento debido al uso de la zonificación, los otros modelos empatan o sobre salen en los demás indicadores. Con respecto a la distribución del tiempo de los médicos en su jornada laboral, el optimizador logra minimizar el tiempo de ocio de los médicos y maximizar el tiempo de trabajo, mientras que la heurística tiene un desempeño similar al de la situación actual. Ahora bien, el buen desempeño de estos indicadores para el optimizador penaliza la experiencia del usuario, teniendo tiempos de espera superiores a los de la heurística pero menores que la situación actual. Los dos modelos logran atender las solicitudes en el tiempo pactado con las entidades de salud y poseen tiempos de servicio similares a la situación actual. Se destaca que los médicos asignados con el optimizador, trabajan una mayor cantidad de tiempo extra sobrepasando sus jornadas como máximo una hora. Por último, con respecto a la cantidad de solicitudes atendidas por hora la situación actual predomina sobre los modelos diseñados, logrando atender 1.7 pacientes por hora, mientras la heurística y el optimizador atienden 1.1 y 1.05 respectivamente, aunque se resalta que los modelos diseñados realizan una asignación más equitativa del trabajo, al medir una desviación estándar similar de 1.4 de la cantidad de solicitudes atendidas por médico, mientras que la situación actual tiene una desviación estándar de tres, significando que hay médicos que trabajan mucho más que otros.

Con el objetivo de evaluar el rendimiento de los modelos, se realizan a cabo pruebas adicionales que involucran la variación en la cantidad de médicos en las jornadas laborales. Se comienza eliminando un médico de cada jornada, luego se repite el proceso eliminando dos médicos. Además, se explora el impacto de los tiempos contratados al incrementar su duración a cinco horas y posteriormente reducirla a una hora, estableciendo condiciones más flexibles o rígidas.

Para la construcción de las instancias estresadas correspondientes a la cantidad de médicos en las jornadas laborales, en la versión 2 de la simulación se elimina un médico de cada jornada, cumpliendo con el criterio de que si solo hay un médico en la jornada no se elimina. Se realiza lo mismo para la versión 3, solo que eliminando dos médicos de la distribución inicial. La cantidad de médicos asignados a trabajar en cada día de la semana se representa en la Tabla 5.



Tabla 5. Cantidad de médicos para las condiciones estresadas de los modelos durante la semana

Estresando la cantidad de médicos en sus jornadas laborales y comparándolos con el resultado de los modelos con condiciones normales, se resalta un incremento en el tiempo de desplazamiento para los dos modelos aumentando a medida que se tienen menos médicos, esto se debe a que los médicos son forzados a realizar más desplazamientos y posiblemente estos están más alejados de sus atenciones previas, para así cubrir la demanda de los médicos eliminados. Un indicador de mejora es la cantidad promedio de solicitudes atendidas por los médicos, dado que son menos médicos los que están trabajando ellos atienden más solicitudes incrementando exponencialmente a medida que se tienen menos médicos, se atribuye el comportamiento del valor que toma el optimizador en la versión 3 en la Gráfica 10 a que debido a la alta demanda para los pocos médicos que se tienen trabajando, este no logra asignar todas las solicitudes, mientras que la heurística está obligada a asignar a un médico sin importar las condiciones.



Gráfica 10. Cantidad de solicitudes promedio atendida por los médicos

Continuando con el análisis, el tiempo trabajado para la heurística va incrementando a medida que se reducen los médicos superando al tiempo trabajado del optimizador, quien anteriormente era el que tenía el mayor valor en este indicador, esto también está ligado a aquellas solicitudes que no son asignadas acabo de la falta de médicos, de forma análoga, el tiempo de ocio es inexisten bajo estas condiciones. Ahora bien, los buenos rendimientos en los indicadores pasados son consecuencia de altos tiempos de espera para los pacientes, como se ilustra en la gráfica 11, en la segunda versión se resalta como con cerca de la mitad de los médicos contratados se logran tener tiempos de espera aun inferiores a los de la situación actual, destacando su eficiencia en la asignación bajo las condiciones expuestas.



Gráfica 11. Tiempo de espera total para los pacientes por médico

Al observar los indicadores faltantes, anteriormente los modelos presentaban solicitudes demoradas, es decir, que llegaban después del tiempo contratado con muy poca frecuencia o ninguna en absoluto, en las condiciones examinadas incrementa su frecuencia, atendiendo en promedio 18 solicitudes fuera del tiempo contratado para la heurística en la versión 2 y en la versión 3 toma un valor de 52 solicitudes, mientras que el optimizador no realiza asignaciones fuera del tiempo contratado, estos valores comparados con la situación actual son aceptables pues en la situación actual se presentan 79 solicitudes promedio por día asignadas fuera del tiempo contratado.

Se destaca que a medida que se disponen de menos médicos la desviación estándar de las solicitudes asignadas a los médicos incrementa, es decir, para los modelos resulta más difícil asignar de forma equitativa las solicitudes, logrando sobrepasar la desviación estándar actual de tres en la versión 3 de la simulación para los dos modelos. Por último, con respecto al tiempo extra que trabajan los médicos fuera de sus jornadas laborales para cumplir con la demanda, este va incrementando para la heurística, destacando nuevamente que en la versión 2 de la simulación se tiene un valor de 37 minutos promedio por médico de tiempo extra, siendo inferior al promedio de la situación actual. Esto se ve representado en la siguiente gráfica:



Gráfica 12. Tiempo de extra total que deben trabajar los médicos fuera de su jornada laboral

Relajando los tiempos contratados y comparándolos con el resultado de los modelos con condiciones normales, se resalta que no existe ningún cambio significativo en la asignación de los médicos, mientras que al reducir el tiempo contratado por las entidades de salud, es notable un cambio en el modelo de optimización, aunque leve, el tiempo de espera de los pacientes disminuye hasta asemejarse al del modelo heurístico el cual no cambia, sin embargo, a causa de la estricta barrera de tiempo la cantidad de solicitudes demoradas para la heurística aumenta de 1 a 15 solicitudes promedio que son atendidas fuera del tiempo contratado. A parte de estos indicadores no se encuentra un comportamiento significativo en ninguno de los otros indicadores.

# Conclusiones y Trabajos Futuros

De acuerdo con los resultados encontrados, podemos concluir que los modelos desarrollados se destacan por un buen desempeño con respecto a la situación actual de la empresa, mejorando el balance de la carga laboral de los médicos, pasando de una desviación estándar de 3.05 a 1.4 y reduciendo los tiempos de espera de tres horas a un máximo de una hora, mejorando la experiencia de los pacientes en general. Enfocándonos en los indicadores buscados por la empresa se destaca que en la situación actual se tiene que los médicos atienden 1.7 pacientes por hora, mientras que la heurística y el modelo lineal solo logran atender 1.11 y 1.05 pacientes por hora respectivamente, sin embargo, de acuerdo con la desviación estándar encontrada este indicador desprecia al ser un promedio la distribución del trabajo con la que se logra este indicador. Con esto en mente, también se ve penalizada la situación actual por medio de los tiempos de demora, que buscan reflejar el tiempo que pasa desde que se cierra la ventana de tiempo contratada por las entidades de salud hasta que el paciente es atendido, en donde la situación actual atiende en promedio 79 solicitudes por día fuera del tiempo contratado mientras que la heurística uno y el modelo lineal 0.

Con respecto a cuál modelo es más apropiado para su uso en la empresa, esto dependerá de la flexibilidad que se desee al momento de realizar las asignaciones. Si existe una preferencia por atender todas las solicitudes entrantes, el modelo heurístico cumple esta labor correctamente, mostrando indicadores favorables. Por otro lado, si se quieren tener limitaciones en el tiempo contratado con las entidades de salud, el modelo de optimización logra cumplir con esto. En caso de que se desee explorar la solución que genera cada uno de los modelos, se encuentran todos los modelos comentados en el siguiente repositorio de GitHub. Ahí se pueden descargar los archivos para ver los diagramas de Gantt, que son interactivos.

Enlace para repositorio de GitHub: <https://github.com/juancbello/AsignacionMedicosDomiciliarios.git>

Además, si se piensa a largo plazo, es importante entender qué capacidad debe tener la empresa para responder a la demanda y así poder ajustar la cantidad de médicos asignados por turno, asegurando ocho horas de trabajo. Esto puede convertirse en una ventaja competitiva, ya que garantizar a los pacientes que los médicos que los atenderán se encuentran en las mejores condiciones genera confianza y tranquilidad. Un mejor manejo de los datos, la implementación de estos modelos puede reducir el error humano, al tener un registro incorrecto de los datos. De esta forma las operadoras se pueden concentrar en generar un mejor diagnóstico de los pacientes e incluso aplicar cierto sistema de triaje para permitir el reagendamiento dependiendo de la urgencia.

Para trabajos futuros es posible abordar de manera más profunda un modelo predictivo que permita encontrar la probabilidad de que llegue una solicitud dado un espacio y tiempo cerca a la ubicación de un médico, para así predecir cual será la mejor política de decisión para la asignación de los médicos. Por otro lado, se reconoce que actualmente los desarrollos tecnológicos de la empresa permiten conocer las longitudes y latitudes de los médicos y sus pacientes, pero de forma limitada, por lo que la posibilidad de contratar los servicios de una API para la geolocalización podría ser favorable para la empresa. Por último, buscando una implementación en tiempo real de los modelos diseñados, será importante encontrar estrategias que logren simular de forma más efectiva la distancia entre los nodos evaluados, para tener en cuenta variables como el tráfico y el sentido de las calles en la ciudad de Bogotá, es decir desarrollar un modelo complementario de ruteo de vehículos.

Por último, se debe diseñar la integración del modelo seleccionado al aplicativo de la empresa, o en su defecto se debe crear una nueva interfaz, y definir el flujo de actividades para capacitar a los operarios en su utilización. Luego de integrar el modelo sería interesante generar experimentos reales, en los que se varie los horarios de los médicos y la cantidad disponible en cada franja hasta encontrar la cantidad que garantice buenas métricas sin tener exceso de recursos. La ventaja en general de cualquiera de las dos soluciones es que se pueden ajustar en tiempo real, se pueden agregar y quitar restricciones de acuerdo con los requerimientos y dinámicas de la demanda.

# Referencias

ADOM. (2022). Conoce ADOM. Recuperado el 9 de noviembre de 2022 de: <https://www.adom.com.co/conoce-adom/>

Amaya, C; Espitia, J. (2016). Scheduling Mobil Medical Units for Home-healthcare Service. In Proceedings of 5th the International Conference on Operations Research and Enterprise Systems - Volume 1: ICORES, ISBN 978-989-758-171-7, pages 100-106. DOI: 10.5220/0005661301000106

Balakrishnan, A., et al. (2002). Vehicle and crew scheduling in bus transportation: A case study. Transportation Science, 36(2), 160-175.

Bowers, J., et al. (2013). Real-time patient assignment and prioritization for emergency departments. IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering, 3(2), 115-131.

Beasley, J.E; Cao, B. (1996) A tree search algorithm for the crew scheduling problem. European journal of operational research, Vol.94 (3), p.517-526. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00093-3

Cámara de Comercio. (2022). Radar de Eficiencia y Competitividad Logística - Velocidad promedio. ccb.org.co. <https://www.ccb.org.co/observatorio/Entorno-para-los-negocios/Entorno-para-los-negocios/Radar-de-Eficiencia-y-Competitividad-Logistica/Velocidad-promedio>

EMIS (2022). Home Health Care and Residential Nursing Care Services Market Global Briefing 2022: Ukraine-Russia War Impact Including: Nursing Care Facilities; Home Health Care Providers; Retirement Communities; Orphanages & Group Homes. Recuperado de EMIS.

Kuo, Y. C., et al. (2017). A nurse scheduling problem considering nurse preferences, fairness, and workload balance. Journal of Medical Systems, 41(12), 190.

Ministerio de Salud y Protección Social. (s.f.). Colombia llegó al aseguramiento universal en salud al alcanzar el 99.6% [Comunicado de prensa]. Recuperado de <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Colombia-llego-al-aseguramiento-universal-en-salud-al-alcanzar-el-99.6.aspx>

Muter, İ., et al. (2012). A genetic algorithm approach for personnel scheduling problem in healthcare. Journal of Medical Systems, 36(6), 3765-3777.

Suarez, M. A. (2012). ATENCIÓN INTEGRAL A DOMICILIO. Revista Médica La Paz, 18(2), 52-58. Recuperado el 9 de noviembre de 2022 de: <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-89582012000200010&lng=es&tlng=es>