



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Industrial

Escuela Profesional de Ingeniería Industrial

**Diseño de una herramienta informática para la
optimización del proceso programación de cirugías en
el sector salud**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

AUTOR

Carlos Eduardo SOTO MOSQUERA

ASESOR

Dr. Ernesto ALTAMIRANO FLORES

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Soto, C. (2024). *Diseño de una herramienta informática para la optimización del proceso programación de cirugías en el sector salud*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Industrial, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Carlos Eduardo Soto Mosquera
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74921340
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3392-7289
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Ernesto Altamirano Flores
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	80597422
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5047-9959
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Victor Surco Salinas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09722150
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Roca Becerra
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08114396
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Edgardo Aurelio Mendoza Altez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06605547

Datos de investigación	
Línea de investigación	ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura 4. Gestión organizacional sostenible.
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	Sin Financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Hospital de Emergencias Villa el Salvador País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Villa el Salvador Dirección: Av. 200 Millas 15837 Latitud: -12.23284 Longitud: -76.93438
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Diciembre 2023 – mayo 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Industrial https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.04



UNIVERSIDAD NACIONAL
MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE
INGENIERÍA
INDUSTRIAL

VICEDECANATO ACADÉMICO

ACTA DE SUSTENTACIÓN N°049-VDAP-FII-2024

SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO INDUSTRIAL

El Jurado designado por la Facultad de Ingeniería Industrial, reunido en acto público en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Industrial, el día **jueves 17 de octubre de 2024**, a las 14:00 horas, dio inicio a la sustentación de la tesis:

“DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PROGRAMACIÓN DE CIRUGÍAS EN EL SECTOR SALUD”

Que presenta el Bachiller:

CARLOS EDUARDO SOTO MOSQUERA

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial en la Modalidad:
Ordinaria.

Luego de la exposición, absueltas las preguntas del Jurado y siendo las 15:00 horas se procedió a la evaluación secreta, habiendo sido Aprobado por unanimidad con la calificación promedio de Quince (15), lo cual se comunicó públicamente.

Lima, 17 de octubre del 2024

DR. DANIEL VICTOR SURCO SALINAS
Presidente

MG. JORGE LUIS ROCA BECERRA
Miembro

MG. EDGARDO AURELIO MENDOZA ALTEZ
Miembro

DR. ERNESTO ALTAMIRANO FLORES
Asesor

MG. LUIS ROLANDO RAEZ GUEVARA
Vicedecano Académico – FII





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **ALTAMIRANO FLORES ERNESTO** en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° **000922-2024-D-FII** de la tesis, cuyo título es **DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PROGRAMACIÓN DE CIRUGÍAS EN EL SECTOR SALUD**, presentado por el bachiller **SOTO MOSQUERA CARLOS EDUARDO** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO INDUSTRIAL**, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **8%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del Título Profesional especialidad correspondiente.

Lima, 02 de agosto del 2024

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **ALTAMIRANO FLORES ERNESTO**
DNI: **80597422**

Dedicatoria

A Carlos y Patricia, mis padres,

Por su apoyo incondicional, amor y paciencia a lo largo de todo este proceso.

Sin su orientación, esta meta no habría sido posible.

Les dedico este trabajo con todo mi amor, gratitud y admiración.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Alvaro, mi hermano, que me acompañó en cada etapa de este proceso, brindándome siempre el impulso necesario para seguir adelante.

De manera especial, deseo agradecer a mi alma máter, la UNMSM, y la Facultad de Ingeniería Industrial, por brindarme la formación académica y personal que ha sido fundamental para alcanzar esta meta.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.2.1. Determinación del problema	2
1.2.2. Formulación del problema	4
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo principal	5
1.3.2. Objetivos secundarios	5
1.4. Importancia y alcance de la investigación	6
1.5. Limitaciones de la investigación.....	6
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1. Antecedentes del estudio.....	8
2.2. Bases teóricas	14
2.2.2. Modelo de Optimización	16
2.2.3. Cirugía Electiva	18
2.2.4. Modelo de predicción de datos	21
2.2.5. Bosques aleatorios (Random Forest Regressor)	23
2.2.6. Interfaz de usuario	24
2.3. Marco teórico	27
2.3.1. Algoritmos de programación	27
2.3.2. Sistemas de Información en Salud	28
2.3.3. Gestión Hospitalaria	30
2.3.4. Organización del Hospital	32

2.3.5.	Análisis de datos	39
2.3.6.	Programación lineal de enteros mixtos	40
2.4.	Definición de términos	41
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES		43
3.1.	Hipótesis.....	43
3.1.1.	Hipótesis principal.....	43
3.1.2.	Hipótesis secundarias.....	43
3.2.	Variables.....	43
3.3.	Operacionalización de las variables.....	44
CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS		46
4.1.	Área de estudio.....	46
4.2.	Tipo y diseño de investigación	46
4.3.	Población y muestra	46
4.3.1.	Unidad de análisis	46
4.3.2.	Población.....	47
4.3.3.	Tamaño de muestra.....	47
4.3.4.	Tipo de selección.....	47
4.4.	Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	47
4.5.	Análisis estadístico	48
CAPÍTULO V: RESULTADOS		50
5.1.	Diagnóstico del Proceso de Programación	50
5.1.1.	Pasos para la Programación de Cirugías Electivas.....	50
5.1.2.	Análisis de Tiempos y Costos del Proceso Actual	53
5.1.3.	Demostración de la Hipótesis Secundaria 1	55
5.2.	Predicción de Duración de Cirugías.....	55
5.2.1.	Análisis Exploratorio de Datos (EDA).....	55

5.2.2.	Análisis ANOVA.....	61
5.2.3.	Modelo de Random Forest (Bosques Aleatorios).....	62
5.2.4.	Predicción con el modelo en Excel	66
5.2.5.	Demostración de la Hipótesis Secundaria 2	70
5.3.	Algoritmo de Programación de Cirugías	71
5.3.1.	Modelo Matemático	71
5.3.2.	Programación y optimización de cirugías en Python.....	75
5.3.3.	Resultados de la optimización	77
5.3.4.	Demostración de la Hipótesis Secundaria 3	79
5.4.	Diseño de Interfaz de Usuario.....	79
5.4.1.	Descripción.....	80
5.4.2.	Impacto en la Reducción de Tiempos	81
5.4.3.	Demostración de la Hipótesis Secundaria 4	82
5.5.	Implementación de la Herramienta	83
5.5.1.	Evaluación y Análisis de Tiempos.....	83
5.5.2.	Evaluación y Análisis de Costos	85
5.5.3.	Demostración de la Hipótesis Principal.....	85
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN.....		87
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		90
7.1.	Conclusiones	90
7.2.	Recomendaciones	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		94
ANEXOS.....		96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Importancia de la Interfaz de Usuario	25
Tabla 2 Componentes Clave de los Sistemas de Información en Salud	28
Tabla 3 Operacionalización de las Variables	44
Tabla 4 Matriz de Consistencia.....	45
Tabla 5 Tareas que Componen el Proceso de Programación de Cirugías Electivas	53
Tabla 6 Costos del Tiempo Desperdiciado en Programación de Cirugías Electivas	54
Tabla 7 Leyenda Tipos de Cirugía.....	58
Tabla 8 Resultados del Análisis ANOVA	61
Tabla 9 Parámetros Utilizados para Random Forest	63
Tabla 10 Resultados del Modelo Random Forest	65
Tabla 11 Predicción de Duración de Cirugías Electivas con el Modelo en Excel con xlwings	66
Tabla 12 Comparación de Predicciones y Resultados Reales	68
Tabla 13 Índices del Modelo	71
Tabla 14 Parámetros del Modelo	72
Tabla 15 Variables de Decisión del Modelo	73
Tabla 16 Resultado de Programación de Cirugías para el Servicio de Traumatología.....	77
Tabla 17 Reducción de Tiempos por Función.....	82
Tabla 18 Análisis de Tiempos Después de la Implementación	83
Tabla 19 Análisis de Costos después de la Implementación	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cascada V del Modelo de Ciclo de Vida	16
Figura 2 Organigrama del Hospital.....	38
Figura 3 Diagrama de Flujo del Proceso de Programación de Cirugías Electivas	52
Figura 4 Matriz de Correlación de Cirugías Históricas.....	56
Figura 5 Distribución por Tipo de Cirugía	57
Figura 6 Distribución por Grupo de Edad	60
Figura 7 Distribución por Sexo	61
Figura 8 Herramienta para Consulta y Actualización de Datos Médicos de Cirugías Electivas	81

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño de una herramienta informática para optimizar el proceso de programación de cirugías en el sector salud. Se analizó el proceso actual, identificando ineficiencias, y se propuso un modelo de optimización implementando Python, algoritmos de programación lineal y un modelo de predicción Random Forest. Los resultados demostraron una disminución significativa en los tiempos de programación y en los costos operativos, con una reducción del 81% en ambos aspectos. Además, la herramienta proporciona predicciones precisas de la duración de las cirugías y cuenta con una interfaz que centraliza la consulta y actualización de datos, facilitando una mejor gestión del tiempo. La implementación de esta herramienta en un entorno hospitalario demostró su efectividad para mejorar la eficiencia operativa y la calidad del servicio de salud, estableciendo una base sólida para futuras optimizaciones de procesos hospitalarios.

Palabras Clave: optimización, programación de cirugías, herramienta informática, Random Forest, algoritmo de optimización, eficiencia operativa, gestión hospitalaria.

ABSTRACT

This research focuses on the design of an IT tool to optimize the surgery scheduling process in the healthcare sector. The current process was analyzed, identifying inefficiencies, and an optimization model was proposed using Python, linear programming algorithms, and a Random Forest prediction model. The results showed a significant reduction in both scheduling time and operational costs, with an 81% decrease in both areas. Additionally, the tool provides accurate predictions of surgery duration and includes an interface that centralizes data consultation and updates, facilitating better time management. The implementation of this tool in a hospital setting demonstrated its effectiveness in improving operational efficiency and healthcare service quality, establishing a solid foundation for future hospital process optimizations.

Keywords: optimization, surgery scheduling, IT tool, Random Forest, optimization algorithm, operational efficiency, hospital management.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El sector de la salud en el Perú desempeña un papel crucial en la vida de los ciudadanos, siendo parte integral de los servicios públicos del país. Como un componente vital de la infraestructura social, el sector salud se dedica a proporcionar atención y servicios médicos de calidad a una población diversa y extensa. Desde hospitales hasta clínicas y centros de salud, el sistema de salud peruano abarca una amplia gama de servicios destinados a garantizar el bienestar y la salud de sus ciudadanos.

El presente trabajo pretende abordar la implementación de una herramienta informática, diseñada para optimizar la programación de cirugías electivas traumatológicas en un Hospital de Villa el Salvador. Esta herramienta se desarrollará a partir del análisis de datos históricos de cirugías previamente realizadas, lo que permitirá estimar con mayor precisión la duración de las cirugías, determinar el momento óptimo para programarlas y definir la secuencia adecuada entre cirugías largas y cortas. La metodología se basará en el uso de modelos predictivos y análisis de datos para mejorar la eficiencia en el proceso. El objetivo principal de esta investigación es lograr una programación de cirugías más sencilla y eficiente en el servicio de Traumatología en el HEVES, reduciendo tiempos de espera para los pacientes, optimizando la asignación de recursos y aumentando la satisfacción tanto del personal médico como de los pacientes. Se busca establecer una herramienta que contribuya a mejorar la calidad de la atención en el servicio de traumatología y a impulsar al hospital hacia un nivel de excelencia en su servicio. Los resultados esperados de esta investigación

incluyen la implementación exitosa de esta herramienta, la optimización de la programación de cirugías traumatológicas y una contribución significativa a la mejora del sistema de salud en el distrito.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Determinación del problema

El sector médico en el Perú está dividido en dos sectores: público y privado

Sector público

El sector público está conformado por el Ministerio de Salud (MINSA), el Seguro Social de Salud (EsSalud) y las sanidades de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional. El MINSA es el ente rector del sector salud y es responsable de la atención primaria de salud, mientras que EsSalud es la principal aseguradora de salud del país y brinda atención a los trabajadores formales. Las sanidades de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional brindan atención a sus miembros y sus familias.

Según la Superintendencia Nacional de Salud (SUSALUD), en el 2016, son 25 millones 961 mil 557 personas que tienen algún seguro de salud (82,45% de la población). De este total, 19 millones 488 mil 819 (64,82%) se encuentran afiliados al sistema público y 6 millones 472 mil 738 (17,63%) al sistema privado. El sistema público de salud tiene una cobertura universal, pero enfrenta desafíos como la falta de recursos, la infraestructura inadecuada y la escasez de personal. En 2022, el presupuesto del MINSA fue de 11 200 millones de soles, lo que representa el 2,2% del Producto Bruto Interno (PBI).

Sector privado

El sector privado está conformado por las empresas prestadoras de servicios de salud (EPS), las clínicas y hospitales privados. Las EPS son empresas que brindan cobertura de salud a sus afiliados, a cambio de un pago mensual. Las clínicas y los hospitales privados brindan atención a los pacientes que pagan por sus servicios.

Según la Asociación Peruana de Empresas de Salud (APESEG), en 2022, el sector privado de salud atendió a 6,5 millones de personas, lo que representa el 18,5% de la población peruana.

El sector privado de salud ofrece una atención más especializada y de calidad que el sector público, pero es más costoso.

Hospital de Villa el Salvador

En este contexto, el centro hospitalario desempeña un rol crucial al ofrecer servicios médicos de emergencia y atención especializada, incluyendo intervenciones quirúrgicas de mediana complejidad. Operan bajo la categoría de establecimiento de nivel II-2 y se encuentran en el segundo nivel de atención, involucrándose en diversas actividades que abarcan desde la prevención y promoción de la salud hasta la recuperación, rehabilitación, control de riesgos y gestión hospitalaria. Actualmente, son reconocidos como un hospital de referencia en la región de Lima sur, y su influencia se extiende a nivel nacional al recibir pacientes de distintas regiones. En su empeño por alcanzar la excelencia, están comprometidos en fomentar iniciativas que mejoren la calidad de sus servicios y enfatizan el aspecto humano de su sistema de atención médica.

El servicio de traumatología del hospital enfrenta una problemática significativa en la programación de cirugías. Actualmente, el proceso de asignación de programación de cirugías es manual y carece de una herramienta eficiente para optimizar el proceso. Esto ha llevado a desafíos en la asignación de recursos y ha generado ineficiencias en el uso de un quirófano por día, el cual es proporcionado con un par de semanas de anticipación para los martes, miércoles, viernes, sábados y domingo en dos turnos, uno de 8 am a 2 pm y el otro 2 pm a 8 pm y los jueves ocupando solo el primer turno del mes en curso. La falta de un sistema eficiente ha dificultado la tarea de priorizar cirugías según urgencia y la duración, lo que a menudo resulta en retrasos y subutilización del tiempo quirúrgico.

Además, el personal del hospital se ve abrumado por la complejidad de coordinar cirugías en función de la disponibilidad de días y la duración estimada. La necesidad de calcular manualmente estas variables y organizar las cirugías ha llevado a un aumento en la carga de trabajo y la posibilidad de errores en la programación. En este contexto, se plantea la necesidad de desarrollar una herramienta que automatice la programación, sugiera un orden eficiente para cada día y tome en cuenta datos históricos para mejorar la precisión en la asignación de quirófano. Esta solución promete mejorar la eficiencia y la atención a los pacientes en el servicio de traumatología del hospital.

1.2.2. Formulación del problema

Problema General

¿En qué medida el diseño de una herramienta informática optimiza el proceso de programación de cirugías en el sector salud?

Problemas Específicos

- ¿Cuál es la situación actual del proceso de programación de cirugías en el sector salud?
- ¿Cómo la recopilación y análisis de datos históricos de cirugías permite predecir la duración de cirugías en el sector salud?
- ¿Cómo un algoritmo de programación permite sugerir una secuencia efectiva de cirugías en el sector salud?
- ¿En qué medida el diseño de una Interfaz de usuario reduce el tiempo de programación de cirugías en el sector salud?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

Diseñar una herramienta informática para optimizar el proceso de programación cirugías en el sector salud.

1.3.2. Objetivos secundarios

- Diagnosticar la situación actual del proceso de programación de cirugías en el sector salud.
- Estimar la duración de cirugías mediante la recopilación y análisis de datos históricos de cirugías en el sector salud.
- Implementar una herramienta que proponga una secuencia efectiva de cirugías mediante un algoritmo de programación en el sector salud.
- Evaluar cómo el diseño de una interfaz de usuario reduce el tiempo de programación de cirugías en el sector salud.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

La investigación propuesta permite abordar esta problemática mediante el desarrollo de una herramienta informática que permita la optimización de la programación de cirugías en el servicio de traumatología de un hospital de Villa el Salvador.

La herramienta busca mejorar la eficiencia operativa en el servicio de traumatología, reducir la complejidad del proceso de programación de cirugías. Esto conllevará a ser un hospital aún más competente y aspirar a atender necesidades de manera más eficiente y oportuna a través de calidad de servicios.

Incrementar la efectividad del proceso se traduce en reducir tiempos de espera y aumentar la satisfacción de pacientes y profesionales de la salud, debido a su relación directa. Asimismo, logra optimizar la asignación de recursos, especialmente, la utilización de quirófanos y reducir costos en horas-hombre al ahorrar valiosas horas a los residentes del hospital.

1.5. Limitaciones de la investigación

- a) Limitación de datos: la calidad de los resultados de la investigación depende en gran medida de la disponibilidad y precisión de los datos históricos. La limitación en la disponibilidad de datos detallados o la falta de registros de cirugías pasadas puede afectar en la precisión de los modelos predictivos y estimaciones.
- b) Generalización limitada: los resultados y soluciones propuestas pueden no ser directamente aplicables a otros servicios de salud o hospitales debido a las diferencias en los procedimientos quirúrgicos, la casuística

de pacientes y las prácticas hospitalarias. La investigación se enfoca en un contexto específico y no puede abordar todas las variaciones posibles en la programación de cirugías.

- c) Factores externos impredecibles: la investigación se centra en mejorar la eficiencia de la programación de cirugías dentro de un marco planificado. Sin embargo, no aborda factores externos impredecibles, como emergencias médicas no planificadas, que pueden afectar la programación y la asignación de recursos de manera imprevisible.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes del estudio

Aristizábal y Londoño (2019) investigaron sobre la programación de cirugías electivas en una IPS del centro del Valle del Cauca, se menciona que este es un proceso complejo que involucra la coordinación de múltiples recursos y factores, lo que puede generar retrasos, cancelaciones y otros problemas que afectan la calidad de los servicios de salud. El objetivo principal consistió en desarrollar un modelo matemático que permita optimizar la programación de cirugías electivas en la IPS objeto de estudio, considerando factores como la disponibilidad de recursos, las restricciones de tiempo y las preferencias de los pacientes. Para lograr este objetivo, se utilizó la metodología basada en el levantamiento de procesos, la identificación de restricciones y recursos, la definición de un modelo matemático y la implementación y validación del modelo utilizando software especializado. Los resultados del proyecto muestran que el modelo de programación de cirugías electivas desarrollado puede mejorar la eficiencia y calidad de los servicios de salud en la IPS. Asimismo, permitió reducir los tiempos de espera, minimizar retrasos y cancelaciones de cirugías. Cabe resaltar que el modelo es flexible y adaptable a diferentes escenarios y condiciones.

Saavedra y Castaño (2018) evaluaron reglas de prioridad para la programación de cirugías en ambientes con limitada disponibilidad de recursos. La problemática principal que se aborda es la dificultad que enfrentan las instituciones de salud para programar cirugías de manera eficiente debido a la falta de personal especializado y recursos. El principal objetivo fue proponer

estrategias que permitan mejorar la oportunidad de atención en estas instituciones. Para concretar ello, se llevó a cabo un conjunto de experimentos con el fin de determinar las condiciones adecuadas para analizar los resultados de la simulación. La metodología utilizada consistió en la programación de cirugías mediante el uso de bloques operatorios y la aplicación de diferentes reglas de prioridad. Los resultados del proyecto indicaron que la combinación del uso de bloques operatorios y la regla de prioridad adecuada puede optimizar programación de cirugías. La regla de prioridad basada en el tiempo de espera promedio de los pacientes fue la más efectiva para mejorar la oportunidad de atención.

Gamboa y Rodríguez (2017) desarrollaron un modelo de programación para el servicio de salas de cirugía de una clínica universitaria en Bogotá, clínica de cuarto nivel parte de una red con 54 sedes a nivel nacional. Esta clínica contaba con porcentaje de cancelación del 7,36% sobre el 100% de las cirugías programadas mensualmente, lo que equivalía a un costo de \$302.000 pesos, que se traducían, a su vez, en más de \$24.000.000 de pesos al mes. El objetivo principal fue crear un sistema de programación para salas de cirugía que facilite la evaluación y optimización de la programación de cirugías, garantizando la atención oportuna y maximizando la utilización de los recursos disponibles. Se emplearon tres metodologías en la planeación y programación de las salas de cirugía: estratégico, táctico y operativo. Los resultados indicaron que el modelo de programación responde a las necesidades del servicio y aprovechamiento de los recursos disponibles, cumpliendo con la programación en el tiempo estimado.

Hernández (2020) presentó una metodología para estandarizar el proceso de programación de salas de cirugía en hospitales. La problemática que se aborda es la falta de eficiencia y calidad en la programación de salas de cirugía, por lo que genera retrasos y aumentar costos. El proyecto tuvo como fin mejorar la eficiencia y calidad en la programación de salas de cirugía. Se utilizó una metodología basada en la mejora continua, que consta de cinco etapas: definir, medir, analizar, mejorar y controlar. En cada etapa se utilizan diferentes herramientas y técnicas, como la carta del proyecto, el diagrama de Gantt, análisis de Pareto y la matriz de priorización. Se tuvo como resultado que la metodología propuesta puede mejorar la eficiencia y calidad del proceso.

Zambrano (2015) se enfocó en la mejora de productividad en el proceso de programación de cirugías en un hospital privado de la ciudad de Guayaquil. Se reconoce que el servicio sanitario, al tener un componente humano, no está exento de errores, por lo que se remarca la identificación y análisis de las causas para plantear soluciones y mejorar la calidad en la prestación del servicio. El objetivo del estudio fue contribuir al mejoramiento de la productividad en el proceso de programación de cirugías. Se busca implementar mejoras en el departamento de cirugía del hospital, a través de la aplicación de herramientas y metodologías de gestión de calidad, como el ciclo de Deming y el análisis de fortalezas, oportunidades, debilidad y amenazas. También se emplean herramientas estadísticas y de gestión de calidad, como el diagrama de causa y efecto, diagrama de flujo y las gráficas de control. Se obtuvieron mejoras en la

calidad y productividad del proceso de programación de cirugías. Estos resultados se cuantifican mediante análisis estadísticos y se presentaron fichas de indicadores.

Ayuso (2023) enfrentó la falta de eficiencia en la planificación y diseño de quirófanos en un hospital, que podía afectar la calidad de la atención médica. Tuvo como objetivo principal maximizar el peso clínico promedio de los pacientes operados en un día del horizonte temporal, es decir, lograr una distribución óptima de los recursos disponibles para mejorar la eficiencia y calidad de la atención médica. Utilizó una metodología que abarca un modelo de programación lineal entera (MILP) como motor de optimización en el sistema de ayuda a la toma de decisiones para la programación quirúrgica. Los resultados del proyecto muestran que la implementación de modelos de programación lineal entera puede mejorar significativamente la eficiencia y calidad de la atención médica en un hospital. Se logró maximizar el peso de la atención médica, el peso clínico promedio de los pacientes operados en un día del horizonte temporal, lo que indicó una mejor distribución de los recursos disponibles. Además, se presentan conclusiones y recomendaciones para mejorar la planificación y diseño de la distribución de quirófanos en el futuro.

Cartes (2016) con su estudio titulado “Algoritmo GRASP para la Programación de Cirugías Electivas en un Hospital Público Chileno” presenta un esfuerzo innovador para abordar la compleja tarea de programar cirugías electivas, asignar salas quirúrgicas y priorizar pacientes en un contexto hospitalario. Este

estudio, enfocado en mejorar la eficiencia y efectividad de los procesos hospitalarios, utiliza una metodología meticulosa que combina una revisión bibliográfica exhaustiva con observaciones directas y cuestionarios en la Unidad de Pabellón de un Hospital Público. Esta metodología integral permite una comprensión profunda y detallada del problema, asegurando que el enfoque del estudio sea tanto práctico como teóricamente sólido. La investigación se apoya en marcos teóricos robustos, como el Scheduling, Problemas de Asignación, Optimización Multiobjetivo, y métodos de solución exactos y metaheurísticas, proporcionando una base sólida para el análisis y desarrollo de soluciones. Estos marcos teóricos no solo enriquecen la comprensión del problema, sino que también guían la aplicación del algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), una técnica avanzada en la ciencia de la computación y la investigación operativa, para la programación eficiente de cirugías electivas. El estudio proporciona un análisis detallado de cómo el algoritmo GRASP puede ser aplicado eficazmente en la programación de cirugías electivas, utilizando datos y parámetros reales extraídos de hospitales públicos. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad y eficacia del algoritmo en la optimización de los procesos de programación de cirugías, comparando su desempeño con modelos matemáticos tradicionales de optimización y resaltando su potencial para mejorar la asignación de recursos y la satisfacción del paciente.

Ríos (2023) en su estudio titulado “Planificación de Cirugías Electivas considerando afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico” se centró en la optimización de la planificación quirúrgica, prestando especial atención a la

asignación de recursos, el manejo de listas de espera, la prioridad de los pacientes, y la compatibilidad entre los miembros del equipo quirúrgico. Se proponen dos modelos principales: un modelo de programación lineal entera (ILP) y un modelo de programación con restricciones (CP), diseñados para asistir en la toma de decisiones en el área de cirugías hospitalarias. Estos modelos son herramientas auxiliares para mejorar la gestión de la lista de espera, los profesionales médicos y los servicios a la comunidad. El estudio incluye tres experimentos para examinar el comportamiento de los modelos al incorporar factores de relación humana en el equipo quirúrgico. Los resultados muestran que la versión B de los modelos, que considera los factores de relación humana como restricciones, es la menos efectiva, resultando en una reducción significativa en la cantidad de pacientes atendidos, la calidad de los equipos quirúrgicos (medida en puntaje de relación humana, PRH) y en la cantidad de cirugías asignadas a los cirujanos. Por otro lado, la versión C de ambos modelos muestra mejoras en comparación con la versión A. Aunque las versiones de ILP-C y CP-C atienden a menos pacientes que sus contrapartes de la versión A, forman equipos quirúrgicos de mayor calidad (en términos de PRH) y asignan un mayor número de cirugías a los cirujanos. Sin embargo, estos resultados están condicionados por el limitado número de cirujanos considerados en el estudio, lo que sugiere la necesidad de experimentar con una mayor cantidad de profesionales para observar diferencias más significativas. En conclusión, la versión C se presentó como la mejor alternativa para asignar equipos quirúrgicos de calidad, mostrando mejores resultados que la versión B y similar eficacia que

la versión A en cuanto a la asignación de cirugías, pero con equipos de mejor calidad.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Herramienta Informática

Una herramienta informática es un programa diseñado para realizar tareas específicas de manera eficiente, facilitando el trabajo de los programadores mediante la reutilización de soluciones existentes en lugar de reinventarlas para cada nueva aplicación. Estas herramientas, a menudo conceptualizadas como filtros, transforman datos de una forma a otra y están diseñadas para ser modulares e interconectables, lo que permite su integración en cadenas de procesamiento de datos (pipes). Un entorno adecuado para el desarrollo de herramientas debe permitir la redirección flexible de entradas y salidas, favoreciendo así la creación de soluciones modulares y generales. Este enfoque no solo ahorra tiempo y esfuerzo, sino que también mejora la eficiencia general al reducir los costos de desarrollo y depuración. La clave es que las herramientas deben ser lo suficientemente generales para aplicarse a diversas tareas sin necesidad de modificaciones extensivas, permitiendo así a los programadores enfocarse en problemas más complejos y específicos.

Según O'Regan (2014) una herramienta informática incluye:

- Metodologías para diseñar, implementar y probar software para satisfacer las necesidades de los clientes.
- El software se ingenia. Es decir, los productos de software están debidamente diseñados, desarrollados y probados de acuerdo con los principios de la ingeniería.

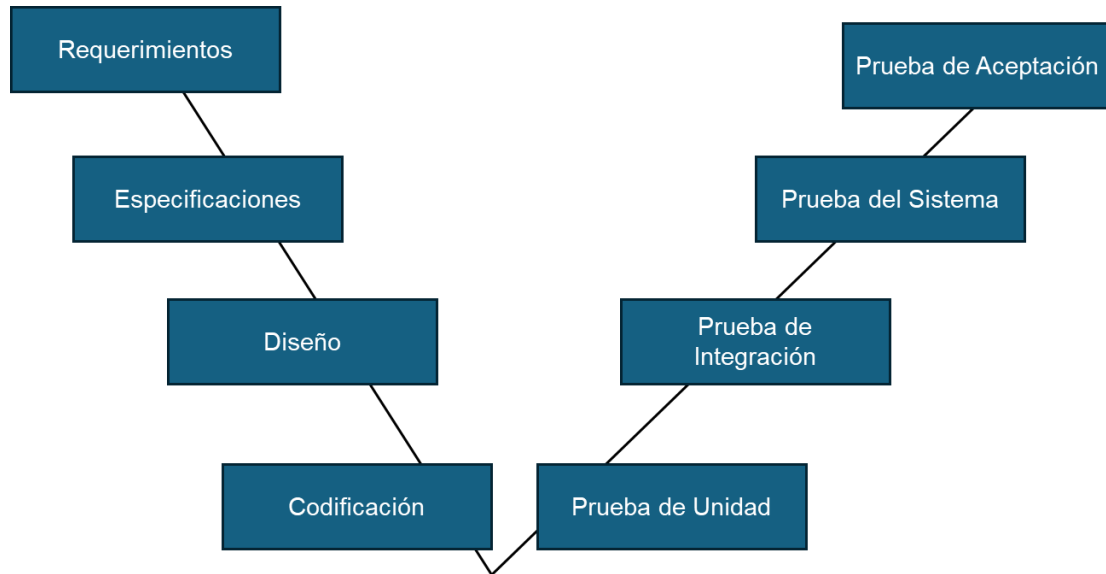
- La calidad y la seguridad se abordan adecuadamente.
- Las matemáticas pueden emplearse para ayudar en el diseño y la verificación de productos de software. El nivel de matemáticas utilizado dependerá de la naturaleza crítica del producto en términos de seguridad. Las revisiones sistemáticas por pares y las pruebas rigurosas a menudo serán suficientes para incorporar calidad en el software, reservando técnicas matemáticas complejas para el software crítico en términos de seguridad y protección.
- Se emplean prácticas sólidas de gestión de proyectos y gestión de calidad.
- El soporte y mantenimiento del software se abordan adecuadamente.

Gráfico Cascada del Ciclo de Vida

El modelo en cascada comienza con la recopilación y definición de requisitos, seguido de la especificación del sistema, el diseño, implementación y pruebas exhaustivas del software, que incluyen pruebas unitarias, de sistema y de aceptación del usuario. Este modelo se usa en proyectos donde los requisitos se conocen desde el principio o con antelación. Se considera como un modelo de ciclo de vida en “V”, con el lado izquierdo abarcando requisitos, especificación, diseño y codificación, y el lado derecho abarcando pruebas unitarias, de integración, de sistema y de aceptación. Cada fase requiere cumplir criterios específicos antes de pasar a la siguiente. Existen variaciones del modelo en cascada y muchas empresas usan plantillas basadas en estándares IEEE o mejores prácticas para asegurar consistencia en todas las fases del proyecto.

Figura 1

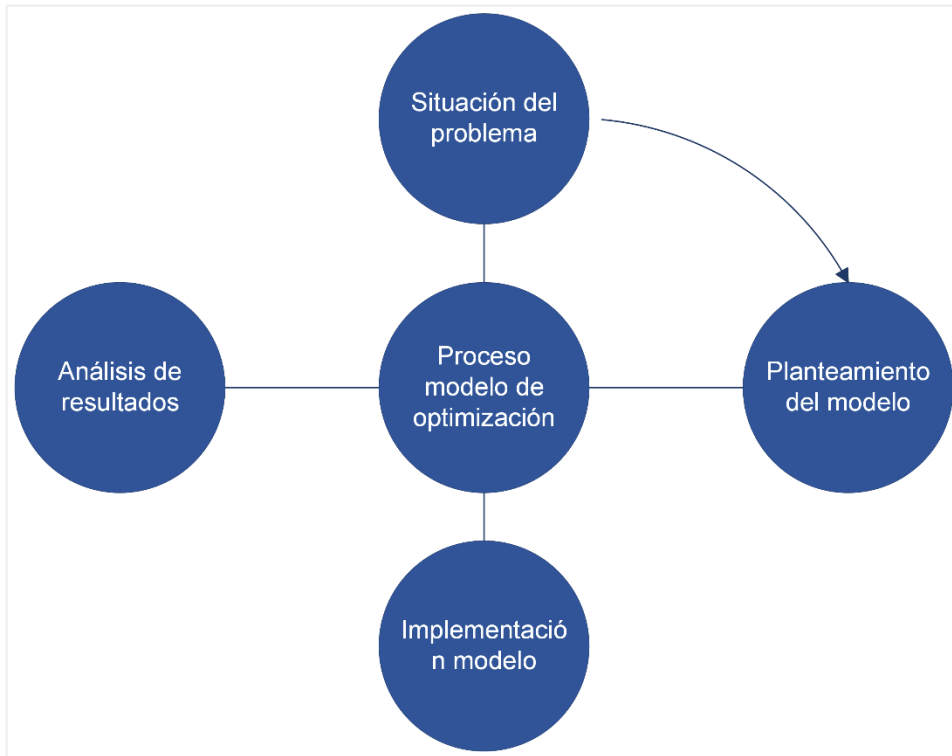
Cascada V del Modelo de Ciclo de Vida



Nota. Recuperado de *Guía Concisa sobre Ingeniería de Software* por Gerard O'Regan, 2017.

2.2.2. Modelo de Optimización

La representación abstracta de un problema real se conoce como modelo, al cual se le aplican consideraciones matemáticas con el objetivo de obtener resultados óptimos. En el ámbito de la investigación de operaciones, se proponen diversos modelos de optimización que brindan respaldo a los gerentes y profesionales en la toma de decisiones. Estos modelos proporcionan pautas esenciales para abordar problemas administrativos y generar valor para la empresa. Por ende, comprender este enfoque de aprendizaje mediante la construcción de modelos capacita a los ejecutivos y gerentes para abordar los aspectos clave de cualquier situación al tomar decisiones (Pérez, 2019).

Figura 3*Proceso de Optimización*

Nota. Tomado de *Introducción a los Modelos de Optimización* por Pérez Peña, Rodrigo, 2019.

Es esencial reconocer que ningún modelo puede abarcar la totalidad de la realidad, ya que son representaciones abstractas de problemas reales. Estos modelos son abstracciones que solo incorporan algunas variables representativas del problema, las cuales, al ser consideradas en el modelo y sometidas a un proceso iterativo, ofrecen una aproximación de las relaciones entre ellas. Este enfoque nos proporciona una comprensión más sencilla de cuándo es apropiado desarrollar un modelo y qué variables son pertinentes en dicho modelo.

Los diversos modelos propuestos en la investigación operacional desempeñan un papel crucial en la toma de decisiones de la gestión, contribuyendo a resolver los distintos problemas que surgen en empresas u organizaciones. Después de implementar mejoras basadas en el modelo, los valores óptimos pueden divergir de la realidad debido a factores externos ajenos al modelo elaborado.

Existen circunstancias en las cuales se puede hablar de "soluciones óptimas" para los desafíos en la administración empresarial, así como para decisiones gubernamentales en la vida real y en el ámbito empresarial. Se aconseja a los directivos de empresas que, antes de aplicar los resultados, realicen un análisis exhaustivo de sus decisiones con respecto a ellos y no confíen completamente en el modelo. Del mismo modo, si la aplicación de los resultados obtenidos no concuerda con las intenciones de la dirección, es recomendable revisar el modelo y realizar ajustes pertinentes.

Para iniciar el proceso de modelado, se emplean modelos simples como punto de partida, a partir de los cuales se desarrollan modelos más elaborados y ricos en información. El modelado progresa hasta que el encargado del proceso determine que el modelo representa de manera satisfactoria el problema de estudio, es decir, se logra un modelo válido.

2.2.3. Cirugía Electiva

Se refiere a procedimientos quirúrgicos que se programan con antelación y no son de emergencia. A diferencia de las cirugías de emergencia, que se llevan a cabo de inmediato debido a una situación médica crítica, la cirugía electiva se programa con anticipación para abordar una condición médica que no es urgente.

Este tipo de cirugía generalmente se planifica después de una evaluación médica y la consideración de varios factores, como la salud general del paciente, la disponibilidad de recursos quirúrgicos y la naturaleza no urgente de la condición que se va a tratar. Ejemplos comunes de cirugía electiva incluyen la extirpación de tumores no cancerosos, cirugía estética, reemplazo de articulaciones programado y procedimientos de corrección de la visión, entre otros. La cirugía electiva permite una mejor programación y preparación, tanto para el paciente como para el equipo médico, antes de la intervención quirúrgica.

Supongamos que un paciente ha sufrido una fractura en un hueso que no requiere intervención inmediata, pero que aun así necesita ser tratada para facilitar una correcta recuperación y evitar complicaciones a largo plazo.

En este caso, el cirujano ortopédico podría programar la cirugía para reparar la fractura en una fecha conveniente para el paciente y el equipo médico. Durante la cirugía electiva, el médico podría utilizar técnicas quirúrgicas para alinear y fijar la fractura, como la colocación de placas o clavos, con el objetivo de facilitar la curación y restaurar la funcionalidad normal del hueso afectado.

Es importante destacar que, aunque la cirugía no es de emergencia, sigue siendo esencial para el bienestar del paciente y se planifica cuidadosamente para garantizar una recuperación exitosa.

El proceso de programación de cirugías electivas implica varias etapas y coordinación entre diferentes profesionales de la salud. Una descripción general del proceso podría ser la siguiente:

- Evaluación Médica: antes de programar cualquier cirugía electiva, el paciente es evaluado por un médico o especialista para determinar la

necesidad de la intervención quirúrgica. Durante esta evaluación, se revisa la historia clínica, se realizan pruebas diagnósticas y se discuten las opciones de tratamiento.

- **Consulta con el Cirujano:** en muchos casos, el paciente se reúne con el cirujano para discutir los detalles de la cirugía, los riesgos y beneficios, así como las expectativas postoperatorias. Este paso también brinda la oportunidad de aclarar cualquier duda que el paciente pueda tener.
- **Programación de la Cirugía:** una vez que se decide realizar la cirugía, se coordina con el paciente y el equipo médico para encontrar una fecha adecuada. Se tienen en cuenta factores como la disponibilidad del quirófano, del cirujano, del anestesiólogo y de otros profesionales de la salud involucrados.
- **Preparación Preoperatoria:** antes de la cirugía, se realizan exámenes preoperatorios para evaluar la salud general del paciente. Estos pueden incluir análisis de sangre, pruebas de imagen y evaluaciones cardíacas, según sea necesario.
- **Consentimiento Informado:** antes de la cirugía, el paciente firma un consentimiento informado, en el cual se le proporciona información detallada sobre el procedimiento quirúrgico, los posibles riesgos y los resultados esperados.
- **Internamiento (si es necesario):** en algunos casos, el paciente puede necesitar ser admitido en el hospital el día anterior a la cirugía. Esto facilita la preparación y asegura que el paciente esté listo para el procedimiento.

- Cirugía Electiva: en la fecha programada, el paciente es admitido en el hospital y se realiza la cirugía electiva según lo planeado. Después de la cirugía, se inicia el proceso de recuperación.
- Seguimiento Postoperatorio: se realiza un seguimiento médico postoperatorio para monitorear la recuperación del paciente y abordar cualquier problema o preocupación que pueda surgir.

La programación de cirugías electivas es un proceso cuidadoso que implica la colaboración de un equipo multidisciplinario para garantizar la seguridad y el bienestar del paciente.

2.2.4. Modelo de predicción de datos

Un modelo de predicción de datos es una representación matemática o estadística que utiliza algoritmos y técnicas de análisis para prever o estimar valores futuros basándose en patrones y relaciones identificadas en datos previos. Estos modelos se emplean en diversas disciplinas y aplicaciones, desde la ciencia de datos hasta el aprendizaje automático y la inteligencia artificial.

Se refiere a un conjunto de técnicas analíticas avanzadas aplicadas a datos históricos para predecir eventos futuros. Estas técnicas pueden incluir regresión, árboles de decisión y redes neuronales. Los modelos de predicción ayudan a identificar patrones, comportamientos y tendencias en los datos históricos para estimar resultados probables en el futuro. La aplicación de estos modelos puede mejorar significativamente la toma de decisiones en diversas áreas, proporcionando un valor considerable a las organizaciones mediante la optimización de operaciones, la prevención de fraudes, y la implementación de campañas de marketing efectivas. (McCarthy, 2021)

Dentro del sector salud puede desempeñar un papel significativo en la programación de cirugías electivas al proporcionar información valiosa para la toma de decisiones.

- **Estimación de Tiempos de Recuperación:** un modelo podría utilizar datos históricos para predecir los tiempos de recuperación esperados para diferentes tipos de cirugías. Esto ayudaría a los profesionales de la salud a programar las cirugías considerando la duración prevista de la recuperación, permitiendo una asignación más precisa de recursos y camas hospitalarias.
- **Priorización de Cirugías:** al analizar datos relacionados con la gravedad de la condición del paciente, la urgencia de la cirugía y otros factores relevantes, un modelo podría ayudar a priorizar las cirugías electivas en función de la necesidad clínica. Esto aseguraría que los casos más críticos o urgentes se aborden de manera eficiente.
- **Optimización de Recursos:** utilizando datos sobre la disponibilidad de quirófanos, personal médico y recursos hospitalarios, un modelo podría contribuir a la programación eficiente de cirugías. Esto minimizaría los tiempos de espera y optimizaría el uso de recursos limitados.
- **Gestión de Listas de Espera:** un modelo podría prever la demanda futura de cirugías electivas basándose en la información histórica y en las tendencias observadas. Esto sería útil para gestionar de manera efectiva las listas de espera, permitiendo una programación que satisfaga la demanda de manera equitativa.

- **Identificación de Factores de Riesgo:** al analizar datos relacionados con el estado de salud de los pacientes y los resultados de cirugías anteriores, un modelo podría identificar factores de riesgo que podrían influir en el éxito de la cirugía. Esto sería útil para personalizar la programación y la atención postoperatoria.
- **Mejora de la Planificación Logística:** un modelo podría contribuir a la planificación logística, anticipando la necesidad de suministros médicos específicos, equipos y personal especializado con base en el tipo de cirugía programada.

2.2.5. Bosques aleatorios (Random Forest Regressor)

El Random Forest Regressor es un algoritmo de aprendizaje automático basado en árboles de decisión. A diferencia de un solo árbol de decisión, que puede ser propenso al sobreajuste (overfitting), un Random Forest construye múltiples árboles de decisión durante el entrenamiento y promedia sus predicciones para mejorar la precisión y controlar el sobreajuste. Cada árbol en el bosque se entrena con una muestra diferente del conjunto de datos (utilizando Bootstrap Sampling) y considera solo un subconjunto aleatorio de características al dividir los nodos, lo que introduce variedad y reduce la correlación entre los árboles individuales.

El proceso de entrenamiento de un Random Forest Regressor implica varias etapas. Primero, se generan múltiples muestras de los datos originales con reemplazo (Bootstrap Samples). Luego, para cada muestra, se construye un árbol de decisión. Durante la construcción de cada árbol, en lugar de considerar todas las características para cada división, el algoritmo selecciona

aleatoriamente un subconjunto de características. Este enfoque ayuda a reducir el sobreajuste y mejora la capacidad de generalización del modelo. Una vez que se han entrenado todos los árboles, el modelo realiza predicciones promediando las salidas de todos los árboles individuales para obtener la predicción final.

Una de las principales ventajas del Random Forest Regressor es su robustez y flexibilidad. Puede manejar tanto datos categóricos como continuos y es resistente a los valores atípicos y a los datos faltantes. Además, es menos sensible a la elección de los hiperparámetros en comparación con otros modelos más complejos. Sin embargo, puede ser computacionalmente intensivo y requerir más memoria debido a la construcción de múltiples árboles, especialmente cuando se trata de grandes conjuntos de datos. En términos de interpretabilidad, aunque el modelo en sí es un conjunto de árboles de decisión individuales, comprender el impacto de cada característica en la predicción final puede ser más complejo que en un solo árbol de decisión.

2.2.6. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario (UI, por sus siglas en inglés, User Interface) se refiere al conjunto de elementos y medios a través de los cuales un usuario interactúa con un sistema, dispositivo o aplicación. La interfaz de usuario puede ser física, como en el caso de los botones y pantallas táctiles, o puede ser virtual, como los menús y controles en una aplicación de software.

En el contexto de la informática y la tecnología, la interfaz de usuario abarca todos los puntos de contacto entre el usuario y el sistema, facilitando la comunicación y la interacción. Una interfaz de usuario bien diseñada busca proporcionar una experiencia intuitiva, eficiente y agradable para el usuario.

El diseño de una interfaz de usuario efectiva tiene en cuenta la usabilidad, la accesibilidad y las expectativas del usuario. En el desarrollo de software, los diseñadores de interfaces de usuario trabajan para crear diseños intuitivos que permitan a los usuarios interactuar de manera eficiente y comprender fácilmente las funciones y características del sistema o aplicación.

Una interfaz de usuario (UI) es fundamentalmente importante por varias razones, ya que actúa como el medio principal a través del cual los usuarios interactúan con sistemas, aplicaciones o dispositivos.

Tabla 1

Importancia de la Interfaz de Usuario

Razones	Descripción
Facilita la Interacción	Proporciona un medio para que los usuarios interactúen de manera efectiva con el sistema o la aplicación. Una interfaz bien diseñada hace que las funciones sean accesibles y comprensibles, facilitando la realización de tareas.
Mejora la Usabilidad	Una interfaz intuitiva y amigable mejora la usabilidad, permitiendo a los usuarios aprender rápidamente cómo utilizar el sistema y realizar tareas sin dificultades. La facilidad de uso es esencial para la satisfacción del usuario.
Aumenta la Eficiencia	Una interfaz de usuario eficiente facilita la realización de tareas de manera rápida y eficaz. Los elementos visuales y controles bien colocados pueden acelerar la navegación y la interacción, ahorrando tiempo al usuario.

Reduce los Errores	Un diseño claro y una disposición lógica de los elementos de la interfaz pueden ayudar a prevenir errores por parte del usuario. Los mensajes de error claros y retroalimentación visual contribuyen a la reducción de equívocos.
Adaptable a Diferentes Usuarios	Una interfaz bien diseñada tiene en cuenta la diversidad de los usuarios, incluyendo diferentes niveles de habilidad, preferencias y necesidades. La adaptabilidad asegura que el sistema sea accesible para una audiencia más amplia.
Fomenta la Retención de Usuarios	Una interfaz atractiva y fácil de usar contribuye a la retención de usuarios. Los usuarios son más propensos a utilizar y permanecer en un sistema que les resulta cómodo y eficiente.
Mejora la Experiencia del Usuario (UX)	La interfaz de usuario es un componente clave de la experiencia del usuario (UX). Una buena UX se traduce en usuarios satisfechos, que son más propensos a recomendar y utilizar nuevamente el sistema o la aplicación.
Apoya el Branding y la Identidad	El diseño de la interfaz puede reflejar la identidad y el branding de una empresa. Una interfaz visualmente coherente con la marca puede fortalecer la imagen y la percepción del usuario sobre la calidad del producto o servicio.
Facilita la Adaptación a Cambios	Una interfaz bien diseñada puede adaptarse a actualizaciones y cambios en el sistema sin causar confusión entre los usuarios. La consistencia y la familiaridad ayudan a mitigar resistencias al cambio.

Nota. Elaboración propia.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Algoritmos de programación

Louridas (2020) señala que los algoritmos son fundamentales en la informática y esenciales para el mundo digital. Básicamente, un algoritmo es una serie de instrucciones específicas y finitas para resolver un problema o completar una tarea. Si se siguen correctamente, estas instrucciones generan el resultado esperado. Los algoritmos son omnipresentes, desde la búsqueda de información en internet, el ordenamiento de datos masivos, hasta la navegación en mapas digitales, desempeñando un papel crucial en la mejora continua de nuestras actividades cotidianas.

Un algoritmo de programación es un conjunto preciso y ordenado de instrucciones o reglas bien definidas que describe un proceso o conjunto de operaciones para realizar una tarea o resolver un problema específico. Los algoritmos son la base fundamental de la programación de software y sirven como un plan detallado que guía la ejecución de un programa de computadora. Estos deben ser diseñados de manera clara y lógica, utilizando un conjunto de pasos finitos que, cuando se siguen correctamente, llevan a la resolución del problema o a la realización de la tarea deseada. La eficiencia y la efectividad de un programa a menudo dependen de la calidad del algoritmo subyacente.

Los algoritmos se pueden clasificar en diferentes tipos, según el problema que resuelven o la forma en que se implementan. Algunos tipos comunes de algoritmos incluyen:

- Algoritmos de búsqueda: se utilizan para encontrar un elemento dado en una colección.

- Algoritmos de ordenamiento: se utilizan para ordenar una colección de elementos.
- Algoritmos de cálculo: se utilizan para calcular valores o funciones.
- Algoritmos de optimización: se utilizan para encontrar la solución óptima a un problema.

Los algoritmos son una parte fundamental de la programación de computadoras. Son esenciales para que los programas funcionen correctamente y para que puedan resolver problemas complejos.

2.3.2. Sistemas de Información en Salud

Los Sistemas de Información en Salud (SIS) son sistemas que integran, almacenan, gestionan y transmiten información relacionada con la salud y la atención médica. Estos sistemas utilizan tecnologías de la información para recopilar, procesar y distribuir datos que son esenciales para la gestión eficiente y efectiva de los servicios de salud.

Añasco y Cobo (2021) declaran que “un sistema de información es una combinación organizada de personas, hardware, software, redes de comunicaciones y recursos de datos que reúne, transforma y disemina información en una organización”

Algunos componentes clave de los Sistemas de Información en Salud se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 2

Componentes Clave de los Sistemas de Información en Salud

Componentes clave	Descripción
-------------------	-------------

Registro Electrónico de Salud (EHR o EMR)	Almacena información médica electrónica de pacientes, incluyendo historias clínicas, resultados de pruebas, tratamientos, y más. Permite un acceso rápido y seguro a la información del paciente.
Sistemas de Información Hospitalaria (HIS)	Se centran en la gestión interna de los hospitales, abarcando áreas como la administración de camas, programación de citas, facturación, entre otras.
Sistemas de Información de Laboratorio (LIS)	Gestionan la información relacionada con pruebas y análisis de laboratorio.
Sistemas de Información de Imágenes Médicas (PACS)	Almacenan, recuperan y presentan imágenes médicas como radiografías, tomografías, resonancias magnéticas, etc.
Sistemas de Información de Farmacia	Ayudan en la gestión y dispensación de medicamentos.
Sistemas de Información de Gestión de Personal de Salud (HRIS)	Se ocupan de la gestión de recursos humanos en entornos de atención médica.

Sistemas de Información de Salud Pública (PHIS)	Recopilan y analizan datos a nivel poblacional para la prevención y control de enfermedades.
Sistemas de Información Geográfica en Salud (GIS)	Utilizan tecnologías de geolocalización para analizar datos de salud en función de la ubicación geográfica.
Sistemas de Información para la Toma de Decisiones (DIS)	Proporcionan datos analíticos y herramientas para ayudar en la toma de decisiones en la gestión de la salud.

Nota. Elaboración propia.

2.3.3. Gestión Hospitalaria

La Gestión Hospitalaria es el conjunto de procesos y actividades destinados a planificar, organizar, dirigir y controlar los recursos y servicios en un entorno hospitalario con el objetivo de lograr una atención médica eficiente, segura y de calidad. Este campo abarca una amplia variedad de funciones y responsabilidades que van más allá de la atención clínica directa y se centran en la administración efectiva de un hospital o centro de salud.

El Ministerio de Salud del Perú (2013) la define como “la función básica del proceso administrativo hospitalario que permite optimizar la oferta hospitalaria a una demanda de necesidades de atención de salud, en la que una gestión objetiva y una adecuada planeación, posibilita la toma de decisiones y gestión administrativa de manera eficiente y oportuna.”

Existen algunas áreas clave de la Gestión Hospitalaria que incluyen:

- Administración de Recursos Humanos: gestión de personal, asignación de tareas, capacitación y desarrollo del personal médico y no médico.
- Gestión Financiera: presupuesto, contabilidad, facturación, gestión de seguros y otras actividades financieras relacionadas con la operación del hospital.
- Gestión de Instalaciones: mantenimiento de las instalaciones hospitalarias, gestión de equipo y tecnología médica, planificación de espacio, y aseguramiento de las condiciones ambientales adecuadas.
- Gestión de la Calidad: implementación y supervisión de programas de control de calidad y aseguramiento de la calidad en la atención médica, cumplimiento de normativas y estándares.
- Gestión de la Información: implementación y mantenimiento de sistemas de información hospitalaria, manejo de registros electrónicos de salud, y garantía de la seguridad y privacidad de la información del paciente.
- Gestión de Operaciones: coordinación de procesos internos, logística, gestión de camas y programación de citas, entre otros.
- Gestión de Servicios de Salud: planificación y desarrollo de servicios médicos, quirúrgicos, de diagnóstico y terapéuticos, así como la coordinación de la atención multidisciplinaria.
- Gestión de Riesgos: identificación, evaluación y gestión de riesgos para la seguridad del paciente, así como el desarrollo de planes de respuesta ante situaciones de emergencia.

2.3.4. Organización del Hospital

El hospital en mención es un centro médico que proporciona atención especializada en salud, así como en situaciones de emergencia y cuidados críticos a la población del sur de Lima. Consta de departamentos, servicios, unidades y especialidades disponibles para los usuarios de salud.

2.3.4.1. *Dirección Ejecutiva*

La Dirección Ejecutiva es la entidad encargada de liderar y establecer las políticas de gestión institucional del hospital.

2.3.4.2. *Órgano de Control Institucional*

El Órgano de Control Institucional es la entidad responsable de supervisar el funcionamiento gubernamental del hospital y se encuentra técnicamente subordinada a la Contraloría General de la República.

2.3.4.3. *Oficina de Planeamiento y Presupuesto*

La Oficina de Planeamiento y Presupuesto es la unidad responsable de gestionar las actividades relacionadas con la planificación, presupuesto, modernización de la gestión y financiamiento público.

2.3.4.4. *Unidad de Asesoría Jurídica*

La Unidad de Asesoría Jurídica es la entidad encargada de brindar asesoramiento legal y jurídico a la Dirección Ejecutiva y otros órganos para asegurar que el hospital cumpla con sus funciones dentro del marco legal.

2.3.4.5. *Unidad de Inteligencia Sanitaria*

La Unidad de Inteligencia Sanitaria es la entidad encargada de recopilar y proporcionar información de calidad y oportuna para la toma de decisiones en

salud pública, incluyendo vigilancia epidemiológica, análisis de la situación de salud y salud ambiental.

2.3.4.6. Unidad de Gestión de la Calidad

La Unidad de Gestión de la Calidad se dedica a implementar los principios, normas, metodologías y procesos del Sistema de Gestión de la Calidad en Salud para mejorar continuamente los servicios.

2.3.4.7. Oficina de Administración

La Oficina de Administración es el órgano de apoyo encargado de supervisar y guiar los sistemas administrativos relacionados con abastecimiento, contabilidad, tesorería y control patrimonial del hospital para asegurar una gestión eficiente y efectiva, de acuerdo con las regulaciones aplicables.

a) Unidad de Economía

La Unidad de Economía es la unidad responsable de gestionar los recursos económicos y financieros necesarios para alcanzar los objetivos del hospital dependiendo de la Oficina de Administración.

b) Unidad de Logística

La Unidad de Logística se encarga de planificar, coordinar, ejecutar y controlar las adquisiciones de bienes, servicios y obras del hospital de acuerdo con las normas y principios del Sistema Nacional de Abastecimiento, además de supervisar y controlar los activos patrimoniales.

c) Unidad de Ingeniería Clínica, Hospitalaria y Servicios

Esta unidad organizativa tiene la responsabilidad de supervisar los servicios generales, el mantenimiento de equipos biomédicos y electromecánicos, así

como la infraestructura del hospital. Está subordinada a la Oficina de Administración.

d) Unidad de Seguros

Esta entidad se encarga de facilitar el acceso a los servicios de atención médica para beneficiarios o asegurados, tanto del sector público como del privado, siguiendo las normativas y directrices vigentes. También depende de la Oficina de Administración.

2.3.4.8. Oficina de Gestión de Recursos Humanos

Este órgano de apoyo tiene la responsabilidad de gestionar el sistema administrativo relacionado con recursos humanos de acuerdo con las regulaciones vigentes. Además, brinda apoyo a actividades de enseñanza e investigación en colaboración con universidades e instituciones educativas.

a) Unidad de Apoyo a la Docencia e Investigación

Es la unidad encargada de respaldar la enseñanza en colaboración con instituciones educativas y llevar a cabo investigaciones y producción científica.

2.3.4.9. Unidad de Comunicaciones e Imagen Institucional

Esta unidad es responsable de establecer la comunicación y relaciones públicas necesarias para alcanzar los objetivos del hospital.

2.3.4.10. Departamento de Articulación Prestacional

Este departamento se encarga de coordinar la atención integral de la salud y la referencia de pacientes dentro y fuera del hospital, tanto para nuevos pacientes como para aquellos que continúan su tratamiento.

a) Servicio de Atención y Orientación al Usuario

Esta unidad tiene la tarea de brindar atención personalizada a los usuarios, realizar trámites administrativos y orientar a los pacientes hacia los servicios adecuados, ya sea consultas externas u hospitalización.

b) Servicio de Referencia y Contrarreferencia

Esta unidad se encarga de garantizar la continuidad de la atención médica a través de un sistema eficiente de referencia y contrarreferencia, mejorando la salud del paciente al coordinar la atención primaria, preventiva y recuperativa.

2.3.4.11. Departamento de Atención Ambulatoria y de Hospitalización

Este departamento facilita, regula y programa el acceso de los usuarios a la atención médica ambulatoria y hospitalaria, incluyendo ingresos, traslados y altas, así como la gestión de historias clínicas.

a) Servicio de Atención Ambulatoria

Esta unidad proporciona atención ambulatoria clínica y quirúrgica a los pacientes, adaptándola según la complejidad de los casos.

b) Servicio de Hospitalización - Clínica Quirúrgica

Este servicio se dedica a la hospitalización de pacientes para diagnóstico, recuperación y tratamiento, y trabaja en conjunto con servicios de apoyo, diagnóstico, tratamiento, quirúrgicos, obstétricos, de cocina y lavandería.

2.3.4.12. Departamento de Atención de Emergencias y Cuidados Críticos

Este departamento se encarga de brindar atención médica quirúrgica de emergencia y cuidados críticos, asegurando una atención oportuna a personas en riesgo grave para su salud.

a) Servicio de Emergencia

Esta unidad se dedica a la atención especializada en cirugía de emergencia para pacientes en riesgo de salud grave o alteración severa.

b) Servicio de Cuidados Críticos

Este servicio proporciona atención especializada a pacientes críticos que pueden recuperarse, coordinando los recursos del hospital para optimizar su recuperación.

c) Servicio de Anestesiología y Centro Quirúrgico

Este servicio se encarga de la anestesia y analgesia en diversas etapas médicas, así como la organización del centro quirúrgico y unidades de recuperación, además de procesos de esterilización.

2.3.4.13. Departamento de Atención de Apoyo al Diagnóstico y Tratamiento

Este departamento brinda soporte para el diagnóstico y tratamiento de problemas médicos a través de procedimientos, estudios, exámenes, suministros farmacéuticos, dispositivos médicos, alimentos y gestión de la atención del paciente.

a) Servicio de Apoyo al Diagnóstico y Banco de Sangre

Esta unidad ofrece ayuda técnica especializada a través de pruebas analíticas y radiaciones para el diagnóstico de enfermedades, además de gestionar el banco de sangre.

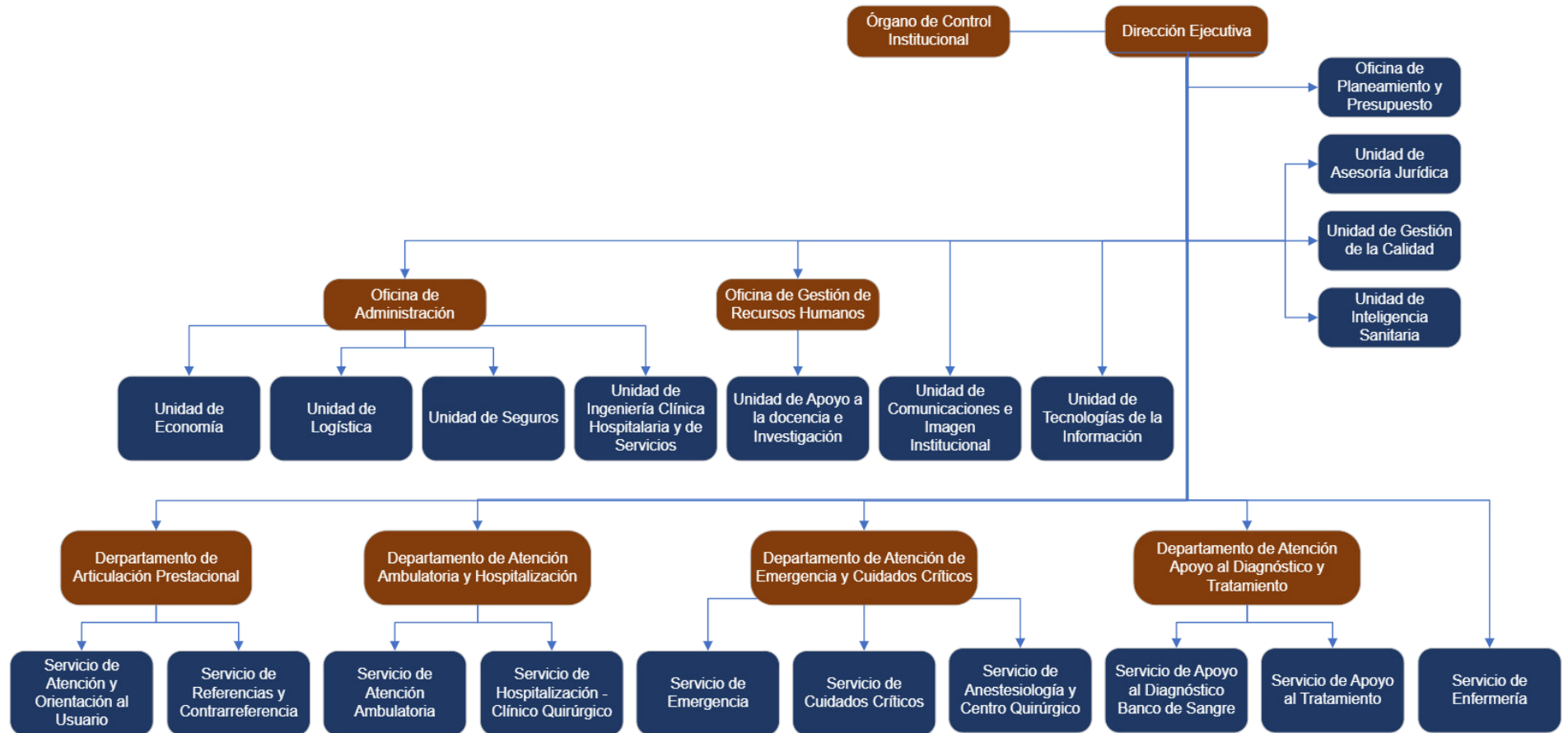
b) Servicio de Apoyo al Tratamiento

Esta unidad se encarga de la atención nutricional, suministro de medicamentos y productos según prescripción médica, así como diagnóstico y tratamiento

psicológico y odontológico, además de investigar factores sociales que influyen en la salud del paciente y rehabilitar sus capacidades.

2.3.4.14. Servicio de Enfermería

Esta unidad ejecuta acciones y procedimientos de enfermería para asegurar una atención integral y personalizada al paciente, considerando su grado de dependencia, diagnóstico y tratamiento médico, e involucra a la familia y la comunidad en el proceso.

Figura 2*Organigrama del Hospital**Nota. Elaboración propia*

2.3.5. Análisis de datos

“El análisis de datos integra distintas operaciones en la que el investigador o analista somete ciertos datos, bien sea de orden cuantitativo o cualitativo, a una serie de análisis, lecturas e interpretaciones, según sea el enfoque de su investigación o requerimiento informativo.” (Peña, 2017).

También se puede definir como el proceso de inspeccionar, limpiar, transformar y modelar datos con el objetivo de descubrir información útil, llegar a conclusiones y apoyar la toma de decisiones. Este proceso puede llevarse a cabo de diversas maneras, utilizando herramientas y técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales y de visualización. El análisis de datos se aplica en una variedad de campos, desde la investigación científica hasta el ámbito empresarial, y desempeña un papel crucial en la extracción de conocimientos significativos a partir de conjuntos de datos.

Existen algunas etapas y conceptos clave asociados con el análisis de datos:

- **Recopilación de Datos:** el análisis de datos comienza con la recopilación de datos relevantes para el problema o la pregunta en consideración. Estos datos pueden provenir de diversas fuentes, como encuestas, experimentos, registros administrativos, sensores, entre otros.
- **Exploración de Datos:** en esta etapa, se realiza una exploración inicial de los datos para comprender su estructura, identificar patrones y visualizar tendencias. Gráficos, estadísticas descriptivas y otras técnicas se utilizan para obtener una visión general de los datos.

- **Limpieza de Datos:** los datos a menudo contienen errores, valores atípicos o información faltante. La limpieza de datos implica corregir estos problemas para garantizar la calidad de los datos y la precisión de los resultados del análisis.
- **Transformación de Datos:** en esta etapa, los datos pueden ser transformados mediante técnicas como normalización, codificación de variables categóricas y creación de nuevas características. Esto prepara los datos para el modelado y facilita la interpretación de los resultados.
- **Modelado de Datos:** se aplican técnicas estadísticas y algoritmos para construir modelos que capturen patrones o relaciones en los datos. Esto puede incluir regresiones, clasificaciones, agrupamientos (clustering) y otros métodos de aprendizaje automático.
- **Validación y Evaluación:** Los modelos resultantes se validan y evalúan para asegurar su capacidad de generalización a nuevos datos. Esto implica dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, y medir la eficacia del modelo en datos no vistos.
- **Interpretación y Comunicación de Resultados:** Los hallazgos del análisis de datos se interpretan y se comunican de manera efectiva a los interesados. Esto puede implicar la creación de informes, visualizaciones, y explicaciones claras de los resultados y las implicaciones para la toma de decisiones.

2.3.6. Programación lineal de enteros mixtos

La programación matemática, y en particular la Programación Lineal Entera Mixta (MILP, por sus siglas en inglés), se ha vuelto muy popular en la resolución

de problemas de programación de procesos debido a su precisión, versatilidad y capacidad de modelado detallada.

MILP es una técnica de optimización matemática utilizada para resolver problemas en los que algunas variables son continuas y otra son enteras. Se basa en la programación lineal, donde el objetivo es maximizar o minimizar una función lineal sujeta a una serie de restricciones lineales. La característica distintiva del MILP es que permite que algunas variables sean enteras, lo que añade complejidad al problema, pero lo hace más realista y aplicable a situaciones del mundo real, como la planificación de la producción, la asignación de recursos y la logística.

MILP es un método es ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su capacidad para manejar problemas de gran escala y su flexibilidad para incorporar restricciones y objetivos específicos. Aunque resolver problemas MILP puede ser computacionalmente intensivo, los avances en algoritmos y softwares han mejorado significativamente su eficiencia y aplicabilidad.

2.4. Definición de términos

Cirugía electiva

Algunos estados, como Massachusetts, definen los procedimientos invasivos no esenciales y electivos como aquellos que se programan con anticipación porque no implican una emergencia médica y proporcionan una lista de ejemplos. (Hernández & Gómez, 2021)

Modelo matemático

El modelado matemático es la aplicación de matemáticas para describir problemas del mundo real y formular preguntas importantes. Consiste en traducir

un problema real a un problema matemático, obtener una solución matemática y luego interpretarla en términos del problema real para hacer predicciones. Este enfoque permite a los matemáticos abordar problemas en diversas disciplinas como biología, química, ecología y economía, realizando experimentos en representaciones matemáticas en lugar de en el mundo real. (Banerjee, S., 2014)

Bosques aleatorios

El método de Random Forest implica entrenar múltiples árboles de decisión, cada uno en un subconjunto aleatorio del conjunto de entrenamiento o un subconjunto aleatorio de las características de entrada. Al combinar las predicciones de estos múltiples árboles, se puede aumentar significativamente la precisión general del modelo. Esta es la idea fundamental detrás del método Random Forest. (Alpaydin, E., 2020)

Optimización

La optimización se define como el arte de hacer las cosas de la mejor manera posible dentro de limitaciones prácticas. A diferencia de métodos basados en experiencia e intuición, la optimización utiliza el poder de las computadoras para examinar sistemáticamente múltiples posibilidades y realizar la búsqueda de la manera más eficiente. (Messac, A., 2015)

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis principal

El diseño de una herramienta informática optimiza el proceso de programación de cirugías en el sector salud.

3.1.2. Hipótesis secundarias

- El diagnóstico del proceso actual permitirá identificar áreas de mejora en la programación de cirugías en el sector salud.
- La recopilación y análisis de datos históricos de cirugías permite predecir la duración en el sector salud.
- Un algoritmo de programación permite sugerir una secuencia efectiva de cirugías en el sector salud.
- El diseño de una interfaz reduce el tiempo de programación de cirugías en el sector salud.

3.2. Variables

Variables independientes:

- Herramienta informática

Variables dependientes:

- Tiempo de programación
- Costos operativos
- Modelo predictivo

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 3

Operacionalización de las Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador	Instrumento de medición
Herramienta Informática	Sistema tecnológico diseñado para mejorar el proceso de programación de cirugías electivas mediante optimización. (O'Regan, 2014)	Implementación de una herramienta informática para programar cirugías.	Nivel de automatización	Grado de automatización y simplificación de tareas en el proceso de programación	Análisis de etapas del proceso antes y después, identificando tareas automatizadas
Tiempo de Programación	Tiempo total invertido en la planificación y organización de cirugías. (Hernández, 2020)	Medición de la duración en minutos del proceso antes y después de la herramienta	Duración total del proceso	Reducción del tiempo de programación	Comparación de tiempos de programación previos y posteriores
Costos Operativos	Conjunto de gastos que se incurren en el día a día en una organización para mantener su funcionamiento. (Hernández, 2020)	Medición del costo mensual del tiempo empleado antes y después de la herramienta	Costo por hora de programación	Reducción en costos operativos	Análisis de costos previos y posteriores a la implementación.
Modelo predictivo	Conjunto de herramientas y técnicas estadísticas que sirven para pronosticar y predecir el comportamiento ante un evento. (McCarthy, 2021)	Precisión del modelo en predecir la duración de cirugías comparado con datos reales.	Precisión de predicción	Error cuadrático medio (MSE), precisión de la duración predicha versus la real.	Comparación entre predicciones del modelo y datos reales de duración.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 4

Matriz de Consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables y Dimensiones	Indicadores e Instrumentos	Indicadores y metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable Independiente: Herramienta Informática Variables Dependientes: - Tiempo de programación - Costos operativos - Modelo predictivo	Indicadores: - Grado de Automatización - Simplificación de tareas Instrumento: - Análisis de etapas del proceso antes y después.	Tipo de investigación: Cuantitativa, cuasiexperimental. Unidad de análisis: Registros de cirugías electivas realizadas en el servicio de traumatología.
¿En qué medida el diseño de una herramienta informática optimiza el proceso de programación de cirugías en el sector salud?	Diseñar una herramienta informática para optimizar el proceso de programación de cirugías en el sector salud	El diseño de una herramienta informática optimiza el proceso de programación de cirugías en el sector salud.			
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas			
PE 1. ¿Cuál es la situación actual del proceso de programación de cirugías en el sector salud?	OE 1. Diagnosticar la situación actual del proceso de programación de cirugías en el sector salud.	HE 1. El diagnóstico del proceso actual permitirá identificar áreas de mejora en la programación de cirugías en el sector salud.	DIMENSIONES: - Nivel de automatización - Duración total del proceso - Costos por hora de programación - Precisión de predicción	Indicadores: - Reducción del tiempo de programación - Reducción en costos operativos - Error cuadrático medio (MSE). Instrumento: - Comparativo de tiempos y costos previos y posteriores. - Comparativo entre predicciones y datos reales.	
PE 2. ¿Cómo la recopilación y análisis de datos históricos de cirugías permite predecir la duración de cirugías en el sector salud?	OE 2. Estimar la duración de cirugías mediante la recopilación y análisis de datos históricos de cirugías en el sector salud.	HE 2. La recopilación y análisis de datos históricos de cirugías permite predecir la duración en el sector salud.			
PE 3. ¿Cómo un algoritmo de programación permite sugerir una secuencia efectiva de cirugías en el sector salud?	OE 3. Implementar una herramienta que proponga una secuencia efectiva de cirugías mediante un algoritmo de programación en el sector salud.	HE 3. Un algoritmo de programación permite sugerir una secuencia efectiva de cirugías en el sector salud.			
PE 4. ¿En qué medida el diseño de una Interfaz de usuario reduce el tiempo de programación de cirugías en el sector salud?	OE 4. Evaluar cómo el diseño de una interfaz de usuario reduce el tiempo de programación de cirugías en el sector salud.	HE 4. El diseño de una interfaz reduce el tiempo de programación de cirugías en el sector salud.			

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

Ingeniería y Tecnología/Otras Ingenierías y tecnología/Ingeniería Industrial/Otras Ingenierías y Tecnologías

4.2. Tipo y diseño de investigación

Dado que se busca resolver un problema específico mediante la aplicación de una herramienta informática, este estudio se clasifica como investigación aplicada. Su objetivo es encontrar soluciones prácticas a problemas concretos en la programación de cirugías electivas. Además, se puede denominar investigación tecnológica, ya que implica el desarrollo de una herramienta tecnológica.

La investigación presenta un diseño cuasiexperimental, según Bono (2012), los diseños cuasiexperimentales, principales instrumentos de trabajo dentro del ámbito aplicado, son esquemas de investigación no aleatorios. Dado la no aleatorización, no es posible establecer de forma exacta la equivalencia inicial de los grupos, como ocurre en los diseños experimentales.

Aunque los diseños cuasiexperimentales tienen limitaciones, como la dificultad para controlar las variables extrañas, se pueden emplear métodos estadísticos apropiados para controlar estas variables y evaluar la validez de los resultados.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Unidad de análisis

Para la unidad de análisis se consideran los registros de cirugías electivas pasadas para el análisis estadístico de duración y programación.

4.3.2. Población

- **Población de registros de cirugías:** incluye todos los registros de cirugías electivas realizadas en el servicio de traumatología del hospital durante un periodo específico, por ejemplo, del último año.

4.3.3. Tamaño de muestra

- **Muestra de registros de cirugías:** de acuerdo con la disponibilidad de datos y un número específico de registros disponibles. Esto es, 852 registros de cirugías electivas dentro de un año.

4.3.4. Tipo de selección

- **Selección de registros de cirugías:** se utilizará una selección aleatoria, asegurando que cada registro tenga la misma probabilidad de ser elegido. Esto garantiza una representación imparcial de los datos históricos.

4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

- **Recolección de datos históricos:** se accederá a la base de datos del hospital para recopilar información sobre cirugías electivas realizadas en el pasado. Los datos incluirán detalles como la duración de la cirugía, el tipo de cirugía, la edad y el sexo del paciente, entre otros. Todos los datos serán anonimizados para proteger la privacidad de los pacientes, cumpliendo con las normativas de protección de datos y ética.
- **Registro del tiempo:** se documentará el tiempo que toma programar las cirugías antes y después de la implementación de la herramienta informática. Esto incluirá la recopilación de datos cuantitativos sobre el tiempo dedicado a la programación de cada cirugía, así como

observaciones cualitativas sobre la eficiencia y cualquier mejora percibida en el proceso.

4.5. Análisis estadístico

En este estudio se utilizó herramientas estadísticas y técnicas de análisis de datos implementadas en Python para abordar las hipótesis y evaluar la efectividad de la herramienta informática diseñada para la optimización del proceso de programación de cirugías electivas. A continuación, se detallan los principales análisis estadísticos que se realizaron:

- **Análisis descriptivo:** se realizó un análisis descriptivo de los datos históricos electivas para comprender la distribución y las características de las variables, como la duración de las cirugías, el tipo de cirugía, la edad y el sexo de los pacientes. Esto incluirá el cálculo de estadísticas descriptivas como medias, medianas, desviaciones estándar y frecuencias.
- **Modelos predictivos:** se empleó modelos de *machine learning*, específicamente el *Random Forest Regressor*, para predecir la duración de las cirugías basándose en las características de los pacientes y los procedimientos. Se evaluará la precisión de estos modelos utilizando métricas como el error cuadrático medio (MSE) y comparación con datos reales en simultáneo.
- **Evaluación de la optimización:** se analizó la eficiencia del proceso de programación de cirugías antes y después de la implementación de la herramienta informática. Esto incluyó la comparación de tiempos de programación, la reducción de tareas administrativas repetitivas y la

optimización del tiempo disponible para los residentes. Mediante análisis estadísticos comparativos, se evaluaron los ahorros en tiempo y costos asociados a la mejora en la eficiencia del proceso.

Estas técnicas permiten evaluar de manera precisa y cuantitativa el impacto de la herramienta informática en la programación de cirugías electivas, proporcionando una base sólida para las conclusiones del estudio.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1. Diagnóstico del Proceso de Programación

En respuesta al objetivo específico 1, se realizó un diagnóstico detallado del proceso actual de programación de cirugías electivas, el cual es realizado por el médico residente, el cual consta de una serie de pasos.

5.1.1. Pasos para la Programación de Cirugías Electivas

Recepción de la solicitud de Cirugía Electiva

Este es el punto de partida donde el servicio de traumatología recibe una solicitud para una cirugía electiva. La solicitud puede provenir de diversos canales como consultas externas, referencias internas. Es importante asegurar que toda la información necesaria esté completa, incluyendo detalles médicos del paciente, historial clínico y necesidades específicas de cirugía.

Evaluación de la solicitud

Aquí se determina si la solicitud procede o no.

- Si **No procede**: la solicitud puede ser rechazada por varios motivos, como la falta de información, no cumplimiento de criterios de elegibilidad, o la cirugía no es apropiada para el servicio de traumatología.
- Si **procede**: la solicitud es aceptada y el paciente es añadido a la lista de espera de cirugías electivas.

Debe haber criterios claros y justos para evaluar las solicitudes, garantizando la equidad y eficiencia en el proceso.

Asignación del tiempo estimado de cirugía

Es crucial estimar la duración de la cirugía para planificar recursos y programar eficientemente el quirófano. Las estimaciones deben basarse en el tipo de

cirugía, la complejidad, y la experiencia previa. Es importante ser lo más preciso posible para evitar eficiencias y retrasos.

Verificación de recursos

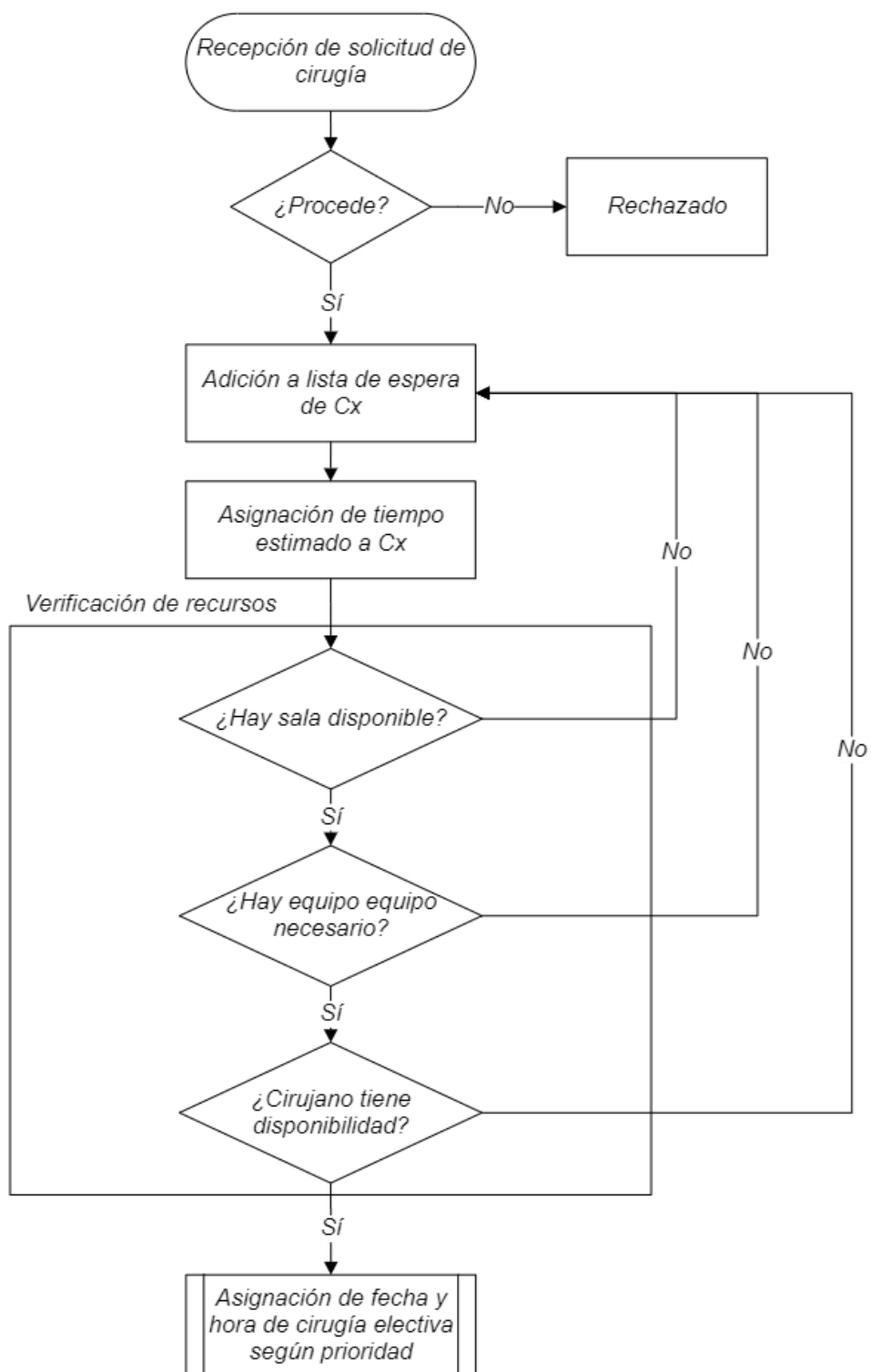
- **Disponibilidad de Sala Quirúrgica:** se debe confirmar que haya una sala disponible que cumpla con los requerimientos específicos de la cirugía.
- **Disponibilidad de equipo necesario:** debe de verificarse que todo el equipo necesario esté disponible y en condiciones óptimas para la fecha estimada.
- **Disponibilidad de cirujano:** aquí se debe confirmar que el médico traumatólogo con la especialización requerida esté disponible para la fecha estimada.
- **Puntos de decisión:** en cada verificación, si la respuesta es “No”, el paciente regresa a la lista de espera. Si es “Sí”, se avanza al siguiente paso.

Asignación de fecha y hora de la cirugía

Una vez confirmados todos los recursos, se asigna una fecha y hora específica para la cirugía. El médico residente debe considerar varios factores al asignar la fecha, incluyendo la urgencia médica, teniendo en cuenta la fecha en la que ocurrió el trauma, la edad, entre otros. Por otro lado, es importante informar al paciente y a todo el personal involucrado sobre los detalles de la programación de la cirugía. Este paso requiere una coordinación efectiva, clara y rápida por parte del médico residente para garantizar que todos los involucrados estén informados y preparados para la cirugía programada.

Figura 3

Diagrama de Flujo del Proceso de Programación de Cirugías Electivas



Nota. elaboración propia.

5.1.2. Análisis de Tiempos y Costos del Proceso Actual

Tabla 5

Tareas que Componen el Proceso de Programación de Cirugías Electivas

Nº	Tareas	Tiempo (minutos)	Total al mes
1	Recepción de solicitud de cirugía	5	5
2	Verificar si procede	5	5
3	Adición a la lista de espera de cirugías electivas	0.5	30
4	Asignación de tiempo estimado a cirugía	5	300
5	Verificación de la disponibilidad de la sala	5	300
6	Verificación y coordinación con proveedores para el equipo necesario	10	600
7	Verificación de la disponibilidad del grupo médico	10	600
8	Asignación de prioridad según fecha del trauma	5	300
9	Asignación de fecha y hora de cirugía	15	900
10	Registro de programación	5	300
11	Confirmación con paciente y equipo médico	5	5
12	Generación de documentación necesaria	2	2
Total			3347

Nota. Elaboración Propia

En el proceso de programación de cirugías electivas en el hospital, se identificaron diversas tareas que los médicos residentes deben realizar. La **Tabla 4** detalla estas tareas, el tiempo estimado que cada una de ellas requiere.

Este desglose detallado de tareas permite comprender mejor el tiempo total que un residente invierte en la programación de una cirugía, el cual asciende a aproximadamente 56 horas al mes.

Tabla 6

Costos del Tiempo Desperdiciado en Programación de Cirugías Electivas

Concepto	Valor
Sueldo mensual del residente	S/. 7000
Horas de trabajo semanales	48 horas
Horas de trabajo mensuales	192 horas
Costo por hora	S/. 36.46
Horas desperdiciadas en programación	56 horas mensuales
Costo mensual del tiempo desperdiciado	S/. 2041.76

Nota. Elaboración propia.

Además, se realizó un análisis de costos para cuantificar el impacto económico asociado a este tiempo invertido. El costo mensual calculado, basado en un costo mensual de S/.7000 por residente, asciende a S/.2041.76. Esto representa un 29% del total percibido por el residente en costos y tiempos que se designan únicamente en realizar la programación de cirugías.

Este análisis subraya la importancia de optimizar el proceso de programación de cirugías no solo para reducir el tiempo invertido por los residentes, sino también para disminuir los costos asociados, mejorando así la eficiencia operativa del servicio de traumatología.

5.1.3. Demostración de la Hipótesis Secundaria 1

Con base en estos resultados, **se concluye que la hipótesis específica 1 es aceptada**. El diagnóstico ha revelado ineficiencias significativas en el proceso de programación de cirugías, lo cual afecta tanto el tiempo total invertido como los costos operativos asociados. Estas ineficiencias subrayan la necesidad de implementar mejoras para optimizar el proceso.

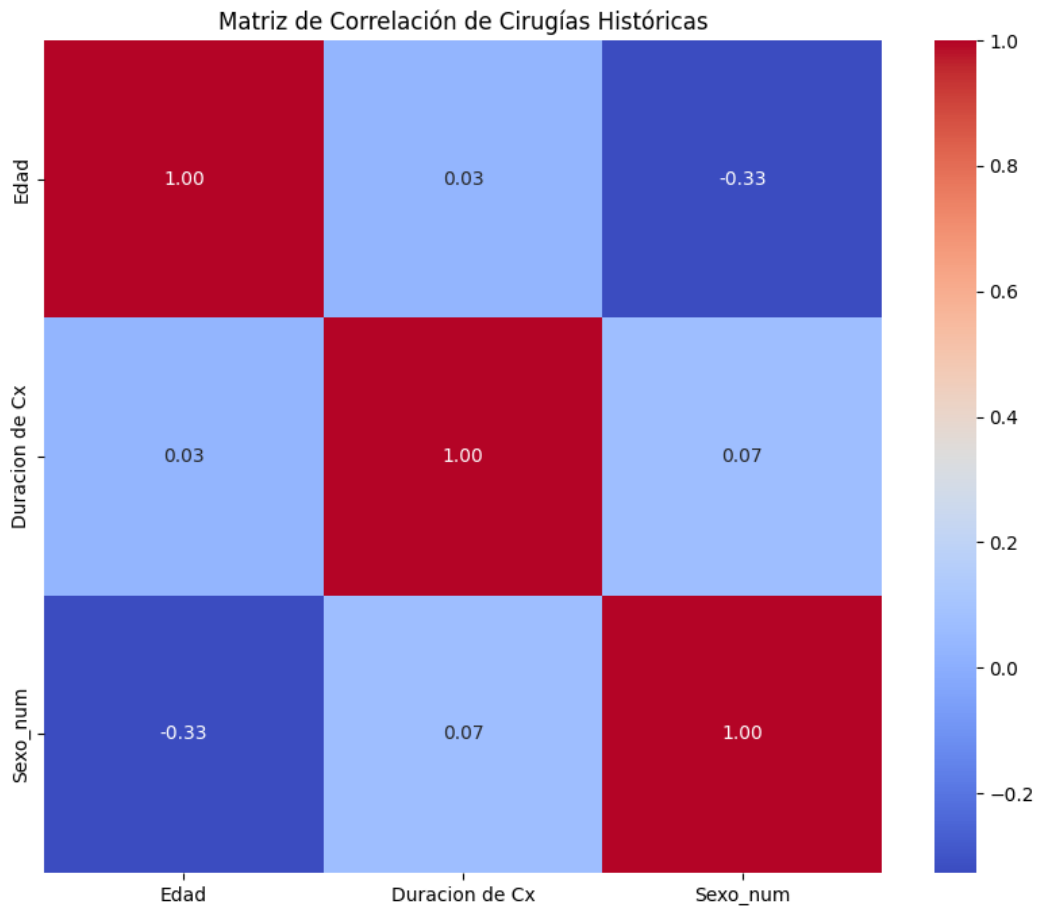
5.2. Predicción de Duración de Cirugías

En respuesta al objetivo específico 2, se llevó a cabo la estimación de la duración de cirugías mediante la recopilación y análisis de datos históricos. El resultado se presenta en cuatro partes: Análisis Exploratorio de Datos (EDA), Análisis ANOVA, implementación del modelo Random Forest y la predicción en Excel.

5.2.1. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

Se realizó un análisis exploratorio de datos (EDA) para comprender mejor las relaciones entre diferentes variables y la duración de las cirugías. Esto incluyó la visualización de la distribución de la duración de la cirugía por tipo de cirugía, agrupación de edades y sexo.

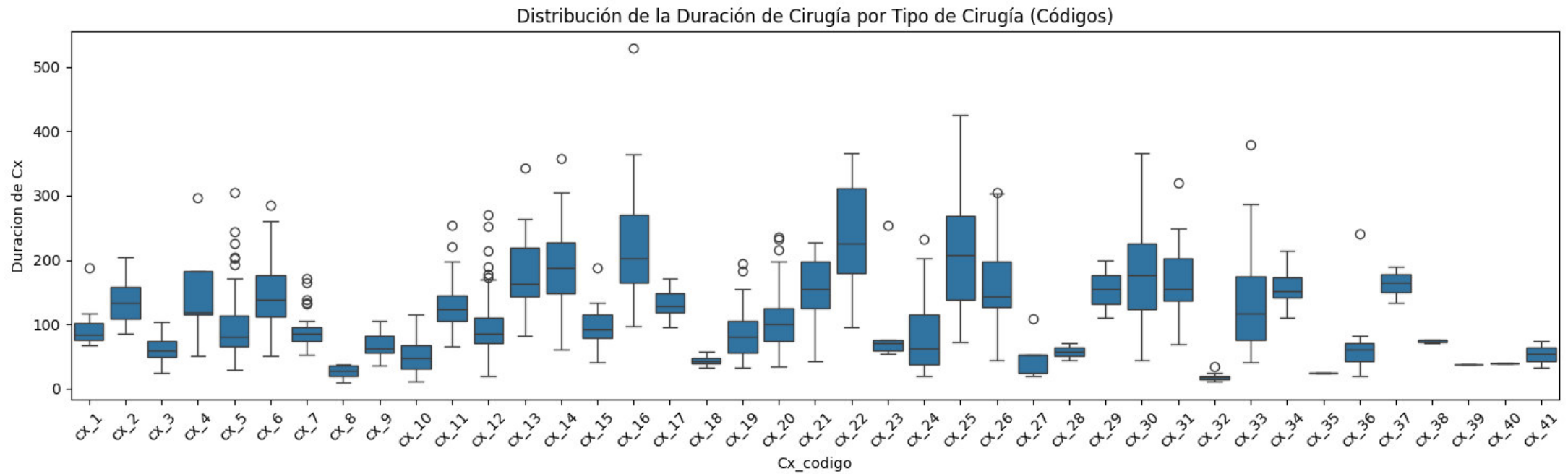
- **Mapa de calor de Correlaciones:** se generó un *heatmap* para visualizar las correlaciones entre las variables numéricas en el conjunto de datos de cirugías.

Figura 4*Matriz de Correlación de Cirugías Históricas*

Nota. Elaboración propia.

Se puede observar que la correlación entre la duración de cirugía y edad es de 0.03 y con el sexo es de 0.07. Una correlación muy baja entre estas variables indica que ni la edad ni el sexo tiene un impacto significativo en la duración de las cirugías.

- **Distribución de la duración de cirugía por Tipo de Cirugía:** se usaron diagramas de caja para mostrar cómo varía la duración de la cirugía según el tipo de cirugía, identificando posibles outliers y la mediana de cada grupo.

Figura 5*Distribución por Tipo de Cirugía**Nota.* Elaboración propia.

- **Distribución de la duración de cirugía por Grupo de Edad:** los diagramas de caja mostraron cómo la duración de la cirugía varía con la edad permitiendo identificar tendencias.

Tabla 7*Leyenda Tipos de Cirugía*

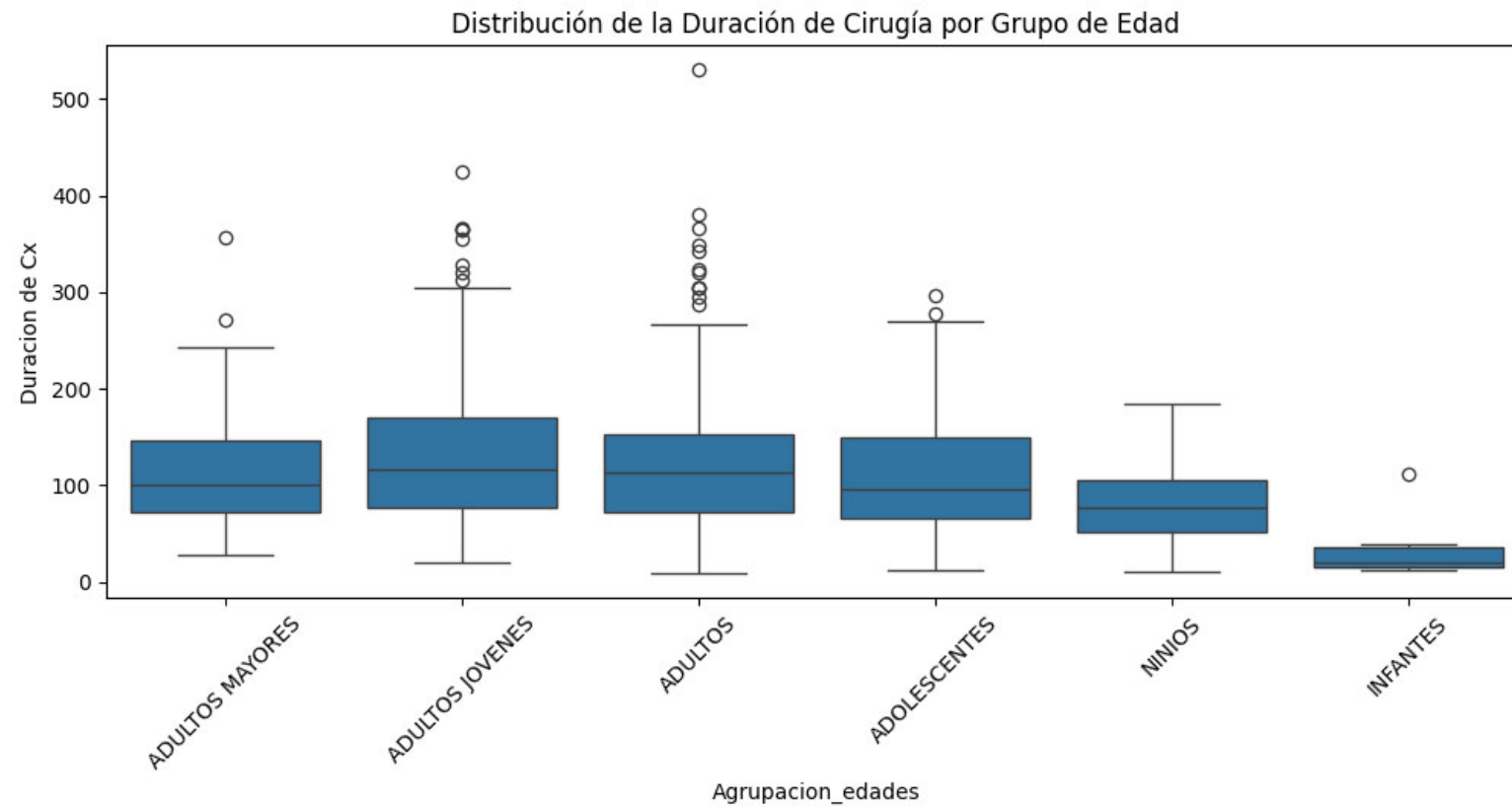
Código	Tipo de Cirugía
<i>cx_1</i>	RAFI DE CUBITO PROXIMAL
<i>cx_2</i>	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO
<i>cx_3</i>	RAFI DE FALANGE/MTC/MTT
<i>cx_4</i>	RAFI DE CABEZA RADIAL
<i>cx_5</i>	RAFI DE CADERA
<i>cx_6</i>	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA
<i>cx_7</i>	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIOCLAVICULAR
<i>cx_8</i>	CIRUGIA AMBULATORIA
<i>cx_9</i>	TENORRAFIA DE AQUILES
<i>cx_10</i>	RETIRO DE IMPLANTE
<i>cx_11</i>	ARTROPLASTIA DE CADERA
<i>cx_12</i>	RAFI DE RADIO DISTAL
<i>cx_13</i>	RAFI DE FEMUR DISTAL
<i>cx_14</i>	RAFI DE TIBIA PROXIMAL
<i>cx_15</i>	RAFI DE ROTULA
<i>cx_16</i>	RAFI DE TIBIA DISTAL
<i>cx_17</i>	RAFI DE CALCANEO
<i>cx_18</i>	AMPUTACION DE DEDO
<i>cx_19</i>	RAFI DE ANTEBRAZO

<i>cx_20</i>	RAFI DE TOBILLO
<i>cx_21</i>	RAFI DE HUMERO DISTAL
<i>cx_22</i>	RAFI MULTIPLE
<i>cx_23</i>	AMPUTACION SUPRACONDILEA
<i>cx_24</i>	LIMPIEZA QUIRURGICA
<i>cx_25</i>	RAFI DE PELVIS
<i>cx_26</i>	RAFI DE FEMUR DIAFISIARIO
<i>cx_27</i>	RAFI DE HUMERO DISTAL PEDIATRICO
<i>cx_28</i>	RAFI OTROS
<i>cx_29</i>	COLGAJO DE DEDO/MANO
<i>cx_30</i>	CIRUGIA RECONSTRUCTIVA
<i>cx_31</i>	ARTROSCOPIA
<i>cx_32</i>	TENOTOMIA DE AQUILES
<i>cx_33</i>	TENORRAFIA/NEURORRAFIA DE MIEMBRO SUPERIOR
<i>cx_34</i>	ARTROPLASTIA DE RODILLA
<i>cx_35</i>	DESVINCULACION DE CROSS FINGER
<i>cx_36</i>	FIJACION EXTERNA
<i>cx_37</i>	RAFI DE ESCAPULA
<i>cx_38</i>	AMPUTACION INFRACONDILEA
<i>cx_39</i>	COLOCACION DE YESO PELVIPEDIO
<i>cx_40</i>	RETIRO DE MATERIAL
<i>cx_41</i>	CAMBIO DE VAC

Nota. Elaboración propia.

Figura 6

Distribución por Grupo de Edad

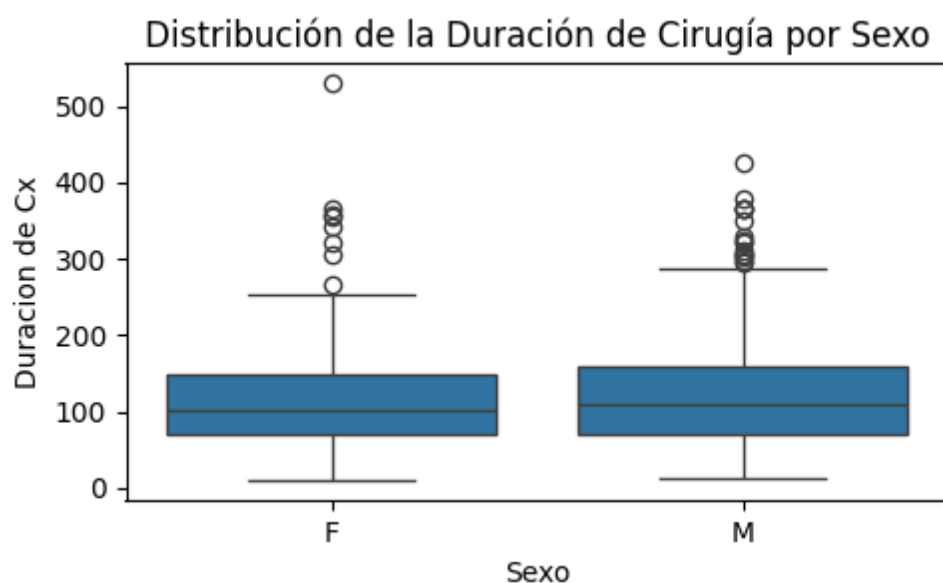


Nota. Elaboración propia.

- **Distribución de la duración de cirugía por Sexo:** se visualizó cómo el sexo del paciente influye en la duración de la cirugía, proporcionando una base para análisis posteriores.

Figura 7

Distribución por Sexo



Nota. Elaboración propia.

5.2.2. Análisis ANOVA

Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar si existen diferencias significativas en la duración de las cirugías entre diferentes grupos categóricos: tipo de cirugía, agrupación de edades y sexo.

Tabla 8

Resultados del Análisis ANOVA

ANOVA	Parámetros
Tipo de Cirugía	F = 16.628, p = 2.7657e-80

Agrupación de Edades	$F = 11.1086, p = 2.2073e-10$
Sexo	$F = 4.2050, p = 0.0406$

Nota. Elaboración propia.

Los resultados para tipo de cirugía con un valor F alto y un valor p extremadamente bajo indican que hay diferencias significativas en la duración de las cirugías según el tipo de cirugía. El mismo caso ocurre con agrupación de edades, esto indica que hay diferencias significativas en la duración de las cirugías según la agrupación de edades. Finalmente, en valor F y valor p en ANOVA según el sexo indican que también hay diferencias significativas en la duración de las cirugías según el sexo, aunque la magnitud de esta diferencia es menor en comparación con otros factores.

Estos resultados presumen que tanto el tipo de cirugía, la agrupación de edades y el sexo son parámetros adecuados para realizar una predicción de cirugías electivas en el servicio de traumatología.

5.2.3. Modelo de Random Forest (Bosques Aleatorios)

Se desarrolló un modelo de Random Forest para predecir la duración de las cirugías. Se codificaron variables categóricas y se optimizaron los hiperparámetros del modelo utilizando RandomizedSearchCV en Python.

Random Forest es robusto frente a outliers y datos ruidosos y puede manejar datos con muchas variables categóricas y continuas, siendo adecuado para problemas médicos donde múltiples factores influyen en los resultados.

La configuración entrenamiento del modelo se conforma por una serie de pasos:

- **Preparación de datos:** se codificaron las variables categóricas usando LabelEncoder para transformarlas en valores numéricos. Las variables

incluyeron tipo de cirugía ('Cx_encoded'), agrupación de edades ('Agrupacion_edades_encoded'), sexo ('Sexo_num'), y edad del paciente ('Edad').

- **División de datos:** se separaron los datos en variables independientes ('x') y la variable dependiente ('y'), que es la duración de la cirugía ('Duracion de Cx').
- **Definición del espacio de parámetros:** se definieron varios hiperparámetros para optimizar el modelo: número de árboles ('n_estimators'), características máximas ('max_features'), profundidad máxima ('max_depth'), mínimo de muestras por división ('min_samples_split'), y mínimo de muestras por hoja ('min_samples_leaf').
- **Optimización del modelo:** se utilizó 'RandomizedSearchCV' para buscar los mejores hiperparámetros mediante validación cruzada (10 pliegues).
- **Entrenamiento del modelo:** se entrenó con los datos de entrada utilizando los mejores hiperparámetros encontrados.
- **Evaluación del modelo:** se evaluó el modelo utilizando el error cuadrático medio (MSE) para medir la precisión de las predicciones.

Tabla 9

Parámetros Utilizados para Random Forest

Parámetros	Valor
Número de árboles ('n_estimators')	400
Mínimo de muestras por división ('min_samples_split')	10

Mínimo de muestras por hoja ('min_samples_split')	4
Características máximas ('max_features')	None
Profundidad máxima ('max_depth')	40

Nota. Elaboración propia.

En la **Tabla 7** se muestra los parámetros escogidos para ejecutar el algoritmo de Random Forest. Más árboles en el bosque reducen la varianza del modelo, mejorando su precisión. Sin embargo, más árboles también aumentan el tiempo de cálculo.

Se escogió un mínimo de 10 muestras requeridas para dividir un nodo, así evitamos el sobreajuste asegurando que cada división se realice solo si hay suficientes datos, manteniendo la robustez del modelo.

El mínimo de muestras requeridas en una hoja elegido fue 4, este controla el tamaño de los nodos hoja, asegurando que cada nodo terminal tenga suficientes datos, lo que ayuda a prevenir el sobreajuste.

Se optó por no incluir características máximas a considerar para cada división. Con esto permitimos que se usen todas las características disponibles para encontrar la mejor división en cada nodo, lo que maximiza el uso de información, mejorando la precisión.

Finalmente, la profundidad máxima de los árboles elegida fue 40. Esto limita la profundidad de los árboles para evitar el sobreajuste, asegurando que los árboles no sean demasiado complejos.

Tabla 10*Resultados del Modelo Random Forest*

Resultado	Valor
Error Cuadrático Medio (MSE)	1890.9136

Nota. Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla 8** muestran el error cuadrático medio del modelo, proporcionando una medida de precisión de las predicciones del modelo. Un MSE más bajo indica un modelo más preciso.

El MSE de 1890.9136, aunque puede parecer alto, es adecuado considerando la naturaleza de los datos:

- **Diversidad de datos:** la duración de las cirugías puede variar significativamente debido a múltiples factores, incluyendo la complejidad de la cirugía, el estado del paciente, y las habilidades del equipo médico.
- **Tamaño de la muestra:** con solo 250 registros de cirugías, el modelo no puede capturar completamente todas las variaciones posibles. Eventualmente, con la acumulación de más datos históricos, el modelo podría entrenarse mejor y reducir el MSE.
- **Ruido en los datos:** la variabilidad inherente y el ruido en los datos médicos pueden contribuir a un MSE más alto.

Un MSE de 1890.9136 es un buen punto de partida para este tipo de estudio. Aunque puede mejorar, ya proporciona una herramienta útil para predecir la duración de las cirugías, lo que es crucial para la planificación y gestión en el entorno hospitalario.

5.2.4. Predicción con el modelo en Excel

Se integró el modelo de Random Forest con Excel utilizando *xlwings*, permitiendo la predicción de la duración de las cirugías directamente desde una hoja de cálculo.

Los usuarios pueden ingresar datos en Excel y obtener predicciones duración de cirugías de manera inmediata, mejorando la eficiencia en la planificación y programación. Esto permite una toma de decisiones más informada y oportuna.

Tabla 11

Predicción de Duración de Cirugías Electivas con el Modelo en Excel con xlwings

Paciente	Edad	Sexo	Cx	Agrupación de Edades	Duración de Cx
Paciente 1	32	M	RAFI DE CADERA	ADULTOS JOVENES	126
Paciente 2	39	M	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS JOVENES	82
Paciente 3	18	M	RAFI DE TOBILLO	ADOLESCENTES	98
Paciente 4	33	F	RAFI DE HUMERO DISTAL	ADULTOS JOVENES	153
Paciente 5	70	F	RAFI DE CADERA	ADULTOS MAYORES	103
Paciente 6	29	F	RAFI DE HUMERO DISTAL	ADULTOS JOVENES	156
Paciente 7	71	M	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS MAYORES	101
Paciente 8	14	M	RAFI DE TIBIA PROXIMAL	ADOLESCENTES	163
Paciente 9	22	M	RAFI MULTIPLE	ADULTOS JOVENES	225

Paciente 10	56	F	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS	91
Paciente 11	29	M	RAFI DE ROTULA	ADULTOS JOVENES	113
Paciente 12	31	F	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	ADULTOS JOVENES	126
Paciente 13	57	M	RAFI DE RADIO DISTAL	ADULTOS	133
Paciente 14	47	F	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS	97
Paciente 15	29	F	RAFI DE RADIO DISTAL	ADULTOS JOVENES	93
Paciente 16	22	F	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS JOVENES	102
Paciente 17	50	M	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	ADULTOS	178
Paciente 18	31	F	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS JOVENES	107
Paciente 19	41	F	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS	115
Paciente 20	29	F	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	ADULTOS JOVENES	140
Paciente 21	73	M	RAFI DE TOBILLO	ADULTOS MAYORES	111
Paciente 22	70	F	RAFI DE CADERA	ADULTOS MAYORES	103
Paciente 23	31	M	RAFI DE RADIO DISTAL	ADULTOS JOVENES	112
Paciente 24	89	F	RAFI DE CADERA	ADULTOS MAYORES	91
Paciente 25	23	M	RAFI DE ANTEBRAZO	ADULTOS JOVENES	91
Paciente 26	42	F	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	ADULTOS	133
Paciente 27	54	F	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	ADULTOS	142
Paciente 28	42	M	RAFI DE ANTEBRAZO	ADULTOS	78

Paciente 29	38	M	RAFI DE ANTEBRAZO	ADULTOS JOVENES	118
--------------------	----	---	-------------------	--------------------	-----

Nota. Elaboración Propia.

En la **Tabla 9** se observa los resultados de la utilización del modelo Random Forest en Excel mediante *xlwings* utilizando como ejemplo a 29 pacientes que se encuentran en lista de espera para cirugía electiva en el servicio. Esta herramienta complementa el conocimiento y la experiencia de los médicos residentes, proporcionando una segunda opinión basada en datos históricos y análisis predictivos.

5.3.5. Margen de error de predicción con la realidad

A continuación, se presenta una comparación detallada entre las predicciones de duración de cirugías generas por el modelo Random Forest y la duración real de las cirugías. Esta comparación es crucial para evaluar la precisión y eficacia del modelo predictivo, permitiendo identificar áreas de mejora y ajustar el modelo para obtener predicciones más precisas en el futuro.

Para realizar esta comparación, se tomaron los datos de duración real de las cirugías para los mismos 29 pacientes utilizados en la predicción y se calculó el error de predicción para cada uno.

Tabla 12

Comparación de Predicciones y Resultados Reales

Paciente	Duración Predicha (min)	Duración Real (min)	Error de Predicción (min)
Paciente 1	126	150	-24
Paciente 2	82	100	-18
Paciente 3	98	105	-7

Paciente 4	153	175	-22
Paciente 5	103	90	13
Paciente 6	156	175	-19
Paciente 7	101	85	16
Paciente 8	163	150	13
Paciente 9	225	235	-10
Paciente 10	91	105	-14
Paciente 11	113	105	8
Paciente 12	126	145	-19
Paciente 13	133	110	23
Paciente 14	97	105	-8
Paciente 15	93	95	-2
Paciente 16	102	105	-3
Paciente 17	178	165	13
Paciente 18	107	105	2
Paciente 19	115	105	10
Paciente 20	140	155	-15
Paciente 21	111	85	26
Paciente 22	103	90	13
Paciente 23	112	125	-13
Paciente 24	91	90	1
Paciente 25	91	110	-19
Paciente 26	133	125	8
Paciente 27	142	125	17

Paciente 28	78	75	3
Paciente 29	118	110	8

Nota. Elaboración propia.

En análisis de los resultados de predicción muestra que el modelo Random Forest presenta un rango de error variable. El error máximo de predicción fue de 26 minutos, lo cual equivale a casi un bloque de tiempo quirúrgico (30 minutos), mientras que el error mínimo fue de 1 minuto. La media de los errores de predicciones para los 29 pacientes es de aproximadamente -1.52 minutos, indicando una ligera tendencia a subestimar la duración de las cirugías. Los errores más significativos incluyen -24 minutos para el paciente 1 y 26 minutos para el paciente 21, destacando la variabilidad en la precisión del modelo.

Los errores significativos, tanto negativos como positivos, indican dificultades del modelo para predecir con precisión en ciertos casos. Aunque el Error Cuadrático Medio (MSE) de 1890.9136 refleja la necesidad de mejoras, el modelo ha demostrado un buen desempeño en algunas predicciones.

5.2.5. Demostración de la Hipótesis Secundaria 2

Con base en los resultados obtenidos con el modelo Random Forest y el análisis ANOVA, **se concluye que la hipótesis específica 2 es aceptada**. El modelo ha permitido predecir de manera efectiva la duración de las cirugías utilizando datos históricos, con un Error Cuadrático Medio (MSE) de 1890.9136 y un margen de error promedio bajo. Estos resultados indican que el análisis de datos históricos es una herramienta viable para mejorar la planificación quirúrgica en el servicio de traumatología.

5.3. Algoritmo de Programación de Cirugías

En respuesta al objetivo específico 3, se implementó un algoritmo de programación que sugiere una secuencia efectiva de cirugías. Este algoritmo toma en cuenta la disponibilidad de recursos, quirófanos y personal médico, para generar una secuencia óptima que minimiza tiempos de espera y maximiza la utilización de los recursos hospitalarios. Este se conforma por un modelo matemático que fundamenta el algoritmo, la programación en Python que permite su ejecución, y finalmente los resultados obtenidos, donde se evalúa la optimización en la secuenciación de cirugías y la mejora en la utilización de los recursos hospitalarios.

5.3.1. Modelo Matemático

Tabla 13

Índices del Modelo

Índices	
$p \in P$	Paciente
$g \in G$	Grupo médico
$s \in S$	Sala Quirúrgica
$d \in D$	Día
$t \in T$	Turno
$b \in B$	Periodo de tiempo

Nota. Elaboración propia.

El modelo cuenta con seis índices, el conjunto de todos los pacientes es representado por P , y un paciente específico dentro del conjunto se representa mediante p . El mismo caso ocurre con grupos de médicos siendo G el conjunto

y g un grupo de médicos específico. El conjunto de salas quirúrgicas es S y s una sala en específica. D es el conjunto de días y d un día en específico. T representa el conjunto de turnos existentes en la programación de cirugías electivas, t un turno específico dentro del conjunto. Por último, B es el conjunto de periodos de tiempo que existen en el horizonte de programación mensual y b un periodo de tiempo específico, cabe resaltar que cada periodo de tiempo corresponde a 30 minutos.

Tabla 14

Parámetros del Modelo

Parámetros	
a_{gbtd}	Indica si el grupo de médicos g trabaja en el periodo de tiempo b del turno t del día d . 1 si se cumple, 0 si no.
τ_p	Duración estimada de la cirugía para el paciente p . Expresado en bloques de tiempo.
s_{sbtd}	Disponibilidad de la sala s en el periodo de tiempo b en el turno t del día d . 1 si se encuentra disponible, caso contrario, 0.
c_{ps}	Indica si la sala s cumple con las necesidades (Arco en C) para atender al paciente p . 1 si cumple con las condiciones, 0 en otro caso.
k_{pg}	Capacidad del grupo g para operar al paciente p . 1 si al menos uno está capacitado, 0 si ninguno lo está.
π_p	Nivel de prioridad o preferencia para la cirugía del paciente p .
θ_p	Si es 1 el significa que el paciente p requiere el arco en C y 0

Nota. Elaboración propia.

Estos parámetros cubren aspectos cruciales del proceso de planificación de cirugías electivas, desde la disponibilidad de recursos hasta las necesidades individuales de los pacientes. La inclusión de estos parámetros en el modelo ayudará a crear un sistema de programación más eficiente y sensible a las necesidades de los pacientes y del personal médico.

Tabla 15

Variables de Decisión del Modelo

Variables de decisión	
x_{pgsdtb}	Indica si el paciente p se atiende con el grupo g en la sala s en el periodo de tiempo b en el turno t del día d . 1 si se cumple, 0 si no.
y_{psdt}	Vale 1 si el paciente p es asignado a la sala quirúrgica s el día d en el turno t ; 0 en otro caso.

Nota. Elaboración propia.

La variable x_{pgsbtd} es fundamental para modelar la asignación de pacientes a grupos médicos y salas en momentos específicos, permitiendo un seguimiento preciso de la programación quirúrgica.

La variable y_{psdt} facilita la gestión de las asignaciones de salas diarias, asegurando que cada paciente esté programado correctamente según la disponibilidad de la sala y los turnos hospitalarios.

Cada una de estas variables de decisión llevará asociadas restricciones específicas en el modelo para asegurar que las asignaciones sean factibles y cumplan con todos los requisitos y limitaciones del hospital.

Función Objetivo

$$\text{Maximizar } \sum_{p \in P, g \in G, s \in S, d \in D, t \in T, b \in B} \frac{1}{\pi_p} \times x_{pgsbt d} \quad (a)$$

Teniendo en cuenta que $\frac{1}{\pi_p}$ es expresada de esta manera para transformar la prioridad de modo que un valor menor indica alta prioridad, siendo 1 la mayor prioridad y 3 la menor. Esta función maximiza la prioridad de los pacientes considerando que los pacientes deben ser asignados adecuadamente a un grupo médico en una sala específica en un día, turno y periodo de tiempo determinados.

Restricciones

Se elaboraron una serie de restricciones para que el modelo pueda funcionar correctamente. La restricción (1) garantiza la continuidad de los bloques de tiempo asignados a cada paciente. La restricción (2) asegura que los grupos médicos y las salas solo sean asignados cuando ambos estén disponibles. La restricción (3) previene la doble asignación de recursos, limitando a un paciente por grupo, bloque, turno y día en una sala específica. La restricción (4) limita a una cirugía por paciente en todo el horizonte de planificación. La restricción (5) vincula las asignaciones de cirugía con los bloques de tiempo correspondientes. La restricción (6) verifica la capacidad del grupo médico. La restricción (7) asegura que cada sala no se use por más de un grupo médico y paciente en cada bloque, turno y día. La restricción (8) asegura que la duración de la cirugía se cumpla correctamente. La restricción (9) limita la asignación de salas a una por día y turno. Finalmente, las restricciones (10) y (11) procuran la integridad de las variables.

Estas restricciones reflejan las limitaciones y requerimientos operativos del servicio de traumatología y son cruciales para desarrollar un algoritmo de programación eficaz y realista. Dependiendo del entorno específico y de los datos disponibles, algunas de estas restricciones podrían necesitar ser ajustadas o refinadas.

Restricciones de Asignación y Capacidad

$$(1) x_{pgsdtb} \leq x_{pgsdtb+1} \forall p, g, s, d, t, b$$

$$(2) x_{pgsdtb} \leq a_{gbtd} \times s_{sbtd} \forall p, g, s, d, t, b$$

$$(3) \sum_{p \in P, s \in S} x_{pgsdtb} \leq 1 \forall g, d, t, b$$

$$(4) \sum_{s \in S, t \in T, d \in D} y_{psdt} \leq 1 \forall p$$

$$(5) y_{psdt} \geq x_{pgsdtb} \forall p, s, d, t, g, b$$

$$(6) x_{pgsbtd} \leq k_{pg} \forall p, g, s, d, t, b$$

$$(7) \sum_{p \in P, g \in G} x_{pgsdtb} \leq 1 \forall s, d, t, b$$

$$(8) \sum_{b \in B} x_{pgsbtd} = \tau_p \times y_{psdt} \times c_{ps} \times \theta_p \forall p, g, s, d, t$$

$$(9) \sum_{t \in T} y_{psdt} \leq 1, \forall p, s, d$$

$$(10) x_{pgsbtd} \in \{0, 1\} \forall p, g, s, b, t, d$$

$$(11) y_{psdt} \in \{0, 1\} \forall p, s, d, t$$

5.3.2. Programación y optimización de cirugías en Python

Python fue elegido por su versatilidad, facilidad de uso y la amplia disponibilidad de librerías para la optimización y manipulación de datos.

Las librerías utilizadas fueron:

- **Pandas:** para la manipulación y análisis de datos, permitiendo una carga fácil y transformación de datos desde archivos Excel.
- **PuLP:** para la creación y solución del modelo de programación lineal entera mixta (MILP), utilizados para optimizar la programación de cirugías.
- **Numpy:** para operaciones matemáticas y manejo de matrices.

El objetivo principal fue diseñar un modelo de optimización para la programación de cirugías en el servicio de traumatología, con el fin de eficientizar el tiempo de los residentes y utilizar de manera óptima los recursos disponibles.

- **Carga y transformación de datos:** se cargaron datos desde archivos Excel que contienen información sobre pacientes, periodos de tiempo, médicos, capacidades y salas. Se realizaron transformaciones necesarias para preparar los datos para el modelo, como convertir duraciones de cirugías a bloques de tiempo de 30 minutos.
- **Definición de parámetros e índices:** se definieron los parámetros necesarios como la duración de las cirugías, la disponibilidad de los grupos médicos y las salas, y la necesidad de equipo especial. Se crearon índices para pacientes salas, días, turnos, periodos y grupos médicos para estructurar el modelo de optimización.
- **Creación de variables de decisión:** se definieron variables de decisión para representar si una cirugía se asigna a un paciente en un cierto bloque, turno y día.
- **Definición de restricciones:** de disponibilidad, capacidad, continuidad y limitaciones de asignación.

- **Función objetivo:** se definió una función objetivo que busca maximizar el número de cirugías programadas con prioridad.
- **Solución del modelo:** se utilizó PuLP para resolver el modelo MILP, obteniendo la programación óptima de cirugías que maximiza la utilización de recursos y el tiempo disponible.

5.3.3. Resultados de la optimización

La **Tabla 14** proporciona un detalle exhaustivo de la programación de cirugías, permitiendo a los lectores ver claramente la asignación de cada paciente por fecha, turno, grupo médico, sala y bloques asignados con sus respectivos horarios.

Tabla 16

Resultado de Programación de Cirugías para el Servicio de Traumatología

Fecha	Turno	Paciente	Grupo Médico	Sala	Bloques asignados	Horario
02/04/24	1	Paciente 22	M1/M2	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
02/04/24	2	Paciente 8	M4/M3	4	13, 14, 15, 16, 17, 18	14:00 - 17:00
03/04/24	1	Paciente 20	M5/M6	4	1, 2, 3, 4, 5	08:00 - 10:30
03/04/24	2	Paciente 12	M7/M6	4	13, 14, 15, 16, 17	14:00 - 16:30
05/04/24	1	Paciente 19	M12/M11	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
05/04/24	2	Paciente 26	M10/M2	4	13, 14, 15, 16, 17	14:00 - 16:30
06/04/24	1	Paciente 17	M15/M6	4	1, 2, 3, 4, 5, 6	08:00 - 11:00
06/04/24	2	Paciente 28	M13/M14	4	13, 14, 15	14:00 - 15:30

07/04/24	1	Paciente 14	M16/M8	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
07/04/24	2	Paciente 9	M5/M1	4	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	14:00 - 18:00
09/04/24	1	Paciente 23	M15/M8	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
10/04/24	1	Paciente 7	M5/M16	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
10/04/24	2	Paciente 27	M10/M17/M7	4	13, 14, 15, 16, 17	14:00 - 16:30
12/04/24	1	Paciente 16	M13/M2	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
12/04/24	2	Paciente 21	M4/M17/M8	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00
13/04/24	1	Paciente 4	M12/M6	4	1, 2, 3, 4, 5, 6	08:00 - 11:00
13/04/24	2	Paciente 3	M16/M19	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00
14/04/24	1	Paciente 2	M13/M21	4	1, 2, 3	08:00 - 09:30
14/04/24	2	Paciente 11	M3/M20	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00
16/04/24	1	Paciente 15	M13/M15	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00
17/04/24	1	Paciente 1	M5/M1	4	1, 2, 3, 4, 5	08:00 - 10:30
19/04/24	1	Paciente 29	M2/M19	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
19/04/24	2	Paciente 18	M4/M10	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00
20/04/24	1	Paciente 10	M14/M6	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
20/04/24	2	Paciente 13	M3/M6	4	13, 14, 15, 16, 17	14:00 - 16:30
26/04/24	2	Paciente 6	M13/M14	4	13, 14, 15, 16, 17, 18	14:00 - 17:00
27/04/24	2	Paciente 5	M18/M8	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00

30/04/24	1	Paciente 25	M1/M20	4	1, 2, 3, 4	08:00 - 10:00
30/04/24	2	Paciente 24	M4/M3	4	13, 14, 15, 16	14:00 - 16:00

Nota. Elaboración propia.

5.3.4. Demostración de la Hipótesis Secundaria 3

Con base en los resultados obtenidos mediante la implementación del algoritmo de programación, **se concluye que la hipótesis específica 3 es aceptada**. El algoritmo ha optimizado la secuencia de cirugías al maximizar la utilización de los recursos hospitalarios y minimizar los tiempos de espera.

La secuencia efectiva generada por el algoritmo se evaluó bajo varios criterios cuantitativos. Se logró un 100% de utilización de quirófanos en los bloques de tiempo asignados, sin tiempos muertos ni solapamientos de recursos. Los tiempos de espera entre cirugías se minimizaron al priorizar a los pacientes de mayor urgencia, programando a aquellos con mayor prioridad ($1/\pi_p$) en los primeros bloques del día.

Esto demuestra que la programación basada en un modelo matemático y resuelta con técnicas de optimización ha generado una secuencia efectiva de cirugías, mejorando la eficiencia del servicio de traumatología.

5.4. Diseño de Interfaz de Usuario

En respuesta al objetivo específico 4, se muestra la composición de la interfaz que se diseñó y los beneficios en la programación de cirugías electivas. Esta se centra en consultar y actualizar datos clave, los cuales son cruciales para el funcionamiento eficiente de la herramienta y del algoritmo de programación. Aunque la interfaz no realiza la programación directamente, su función es vital para asegurar que la información médica, quirúrgica y operativa esté siempre

actualizada, permitiendo que la herramienta complete el proceso de programación de manera óptima.

5.4.1. Descripción

La interfaz de usuario de la herramienta tecnológica de predicción de cirugías electivas para pacientes ha sido diseñada con un enfoque en la simplicidad y eficiencia, garantizando una experiencia fácil de usar pero poderosa para los residentes de traumatología. Consta de seis botones principales, cada uno de los cuales dirige al usuario a una hoja específica de Excel donde se puede consultar o modificar datos relevantes para la programación de cirugías.

- **Incluir Paciente en Lista de Espera:** este botón te lleva a la hoja de pacientes para poder agregar nuevos pacientes a la lista de espera para cirugías electivas. Mantener esta lista actualizada es crucial para la utilización de la herramienta. Cabe mencionar que es en esta pestaña que automáticamente con digitar ciertos datos se realiza la predicción del tiempo de cirugías.
- **Consultar Periodos de Tiempo:** al seleccionar este botón, el usuario accede a una hoja que muestra los diferentes periodos de tiempo que se manejan en el hospital. Siendo esta pestaña una informativa.
- **Consultar Turnos de Médicos:** esta opción permite al usuario revisar los turnos de los médicos del mes en curso, garantizando que la programación de las cirugías se alinee con la disponibilidad del personal médico. Esto es fundamental para evitar conflictos de horarios.
- **Consultar Capacidad de Médicos:** aquí, el usuario puede consultar las capacidades de los médicos, es decir, qué cirugías puede realizar un

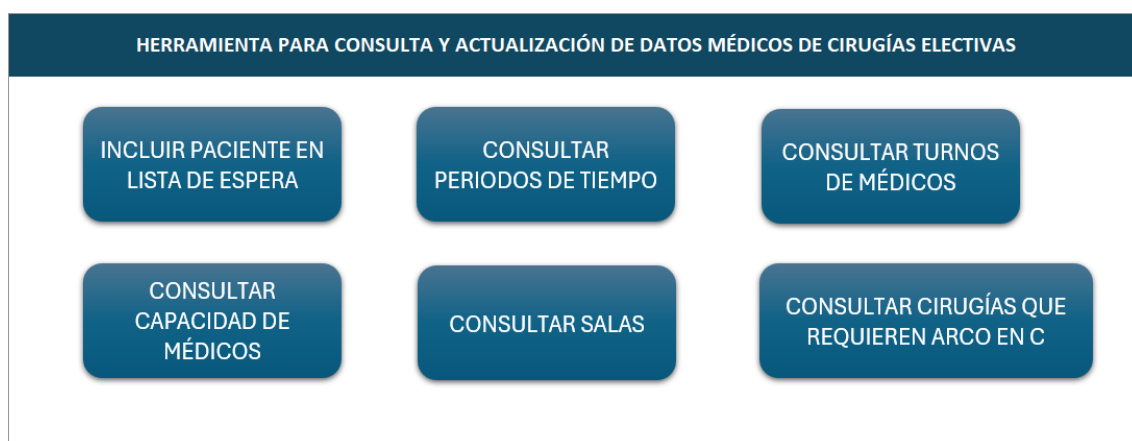
médico y cuáles no. La ausencia de una combinación de médico-cirugía implica que el médico no está capacitado para realizar dicha cirugía.

- **Consultar Salas:** este botón dirige al usuario a una hoja donde se puede revisar el número de sala, la fecha, turno en la que está disponible y si cuenta con Arco en C.
- **Consultar Cirugías que Requieren Arco en C:** esta función específica permite al usuario identificar y gestionar las cirugías que requieren de un arco en C, asegurando que el equipo especializado esté disponible cuando se realice la programación.

Figura 8

Herramienta para Consulta y Actualización de Datos Médicos de Cirugías

Electivas



Nota. Elaboración propia.

5.4.2. Impacto en la Reducción de Tiempos

La interfaz ha demostrado un impacto positivo en la eficiencia operativa, los tiempos reflejados aquí se refieren a la eficiencia ganada en la consulta y modificación de datos críticos, como la lista de espera de pacientes, turnos de

médicos y disponibilidad de salas. Estos procesos, antes dispersos y manuales, ahora están centralizados, lo que ahorra tiempo a los residentes en la búsqueda de información.

Tabla 17

Reducción de Tiempos por Función

Función	Antes de la interfaz (min)	Después de la interfaz (min)	Reducción (%)
Incluir paciente en lista de espera	15 min	7 min	53%
Consultar periodos de tiempo	5 min	3 min	40%
Consultar turnos de médicos	60 min	15 min	75%
Consultar capacidad de médicos	45 min	10 min	78%
Consultar disponibilidad de salas	30 min	25 min	17%
Consultar cirugías que requieren Arco	5 min	5 min	0 %

en C

Nota. Elaboración Propia.

5.4.3. Demostración de la Hipótesis Secundaria 4

Con base en los resultados obtenidos, **se concluye que la hipótesis específica 4 es aceptada**. La interfaz de usuario ha reducido significativamente los tiempos asociados a la programación de cirugías, facilitando la consulta y actualización de información médica crítica. Esto ha permitido mejorar la eficiencia operativa del hospital, con reducciones de hasta un 75% en la consulta de turnos de médicos y un 53% en la inclusión de pacientes en la lista de espera, confirmando el impacto positivo de la interfaz.

5.5. Implementación de la Herramienta

En respuesta al objetivo general del estudio, y tras la implementación de los resultados obtenidos en los objetivos específicos, se ha diseñado una herramienta informática que optimiza el proceso completo de programación de cirugías electivas en el hospital. Esta herramienta integra la consulta, actualización, automatización de datos críticos, lo que ha permitido una notable reducción en los tiempos de programación y costos operativos. Además, mejora en la eficiencia del servicio al liberar a los residentes de tareas administrativas repetitivas, permitiéndoles dedicar más tiempo a la atención directa de los pacientes.

5.5.1. Evaluación y Análisis de Tiempos

A continuación, se muestra los resultados luego de la implementación de la herramienta.

Tabla 18

Análisis de Tiempos Después de la Implementación

N°	Tareas	Tiempo (minutos)	Total al mes
1	Recepción de solicitud de cirugía	5	5
2	Verificar si procede	5	5
3	Adición a la lista de espera de cirugías electivas	0.5	30
4	Asignación de tiempo estimado a cirugía	0.00005	0.003
5	Verificación de la disponibilidad de la sala	0.005	0.3

6	Verificación y coordinación con proveedores para el equipo necesario	0.005	0.3
7	Verificación de la disponibilidad del grupo médico	0.005	0.3
8	Asignación de prioridad según fecha del trauma	5	300
9	Asignación de fecha y hora de cirugía	0.005	0.3
10	Registro de programación	5	300
11	Confirmación con paciente y equipo médico	5	5
12	Generación de documentación necesaria	2	2
Total			648.2

Nota. Elaboración Propia

La implementación de la herramienta informática ha generado una notable disminución en el tiempo total dedicado a la programación de cirugías. Antes de la optimización, se necesitaban 3347 minutos mensuales para realizar todas las tareas relacionadas con la programación de cirugías electivas. Tras la optimización, este tiempo se ha reducido drásticamente a 648.2 minutos al mes. Esto representa una reducción de 2698.8 minutos mensuales. En términos porcentuales, el tiempo dedicado a la programación se ha reducido en aproximadamente un 80.6%. Esta disminución del tiempo permite que los residentes dediquen más horas a la atención directa de los pacientes y a otras tareas médicas importantes, mejorando así la eficiencia general del servicio de traumatología.

5.5.2. Evaluación y Análisis de Costos

Tabla 19

Análisis de Costos después de la Implementación

Concepto	Valor
Sueldo mensual del residente	S/. 7000
Horas de trabajo semanales	48 horas
Horas de trabajo mensuales	192 horas
Costo por hora	S/. 36.46
Horas desperdiciadas en programación	10.8 horas mensuales
Costo mensual del tiempo desperdiciado	S/. 393.77

Nota. Elaboración propia.

El impacto de la optimización en términos de costos laborales es igualmente significativo. Antes de la implementación de la herramienta, el costo mensual asociado al tiempo desperdiciado en la programación de cirugías era de 2041.76 soles. Después de la optimización, este costo se ha reducido a 393.77 soles mensuales. Esto representa una reducción de 1647.99 soles mensuales en los costos laborales. En términos porcentuales, los costos se han reducido en aproximadamente un 80.7%. Este ahorro sustancial en costos laborales no solo evidencia la eficiencia económica de la herramienta, sino que también justifica su implementación en términos de retorno de inversión y optimización de recursos humanos dentro del hospital.

5.5.3. Demostración de la Hipótesis Principal

Con base en los resultados obtenidos tras la implementación de la herramienta informática, **se concluye que la hipótesis principal es aceptada.** La

herramienta ha optimizado significativamente el proceso de programación de cirugías, logrando una reducción del 80.6% en los tiempos y del 80.7% en los costos operativos. Estos resultados evidencian que la herramienta no solo mejora la eficiencia en la programación, sino que también aporta beneficios económicos, justificando su implementación en el servicio de traumatología.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

Con base en el objetivo específico 1, el diagnóstico del proceso de programación de cirugías evidenció un alto nivel de ineficiencia, principalmente debido a la dispersión de la información y la falta de herramientas centralizadas. Estos resultados coinciden con las teorías de gestión operativa hospitalaria, que indican que la fragmentación de los datos es un factor crítico en la pérdida de tiempo y recursos. La ineficiencia identificada refuerza la necesidad de implementar una herramienta informática que centralice la información y facilite el flujo de trabajo, lo que a su vez optimiza el proceso. Este diagnóstico refleja la literatura en gestión hospitalaria sobre cómo los sistemas no integrados obstaculizan la eficiencia.

En cuanto al objetivo específico 2, el modelo predictivo implementado mediante Random Forest proporcionó estimaciones precisas de la duración de las cirugías. Esto se alinea con teorías de modelos predictivos basados en datos históricos que destacan la efectividad de los algoritmos de aprendizaje supervisado para predecir tiempos quirúrgicos. Estudios previos sugieren que la precisión en la predicción permite una mejor planificación de quirófanos, reduciendo tiempos ociosos y maximizando el uso de los recursos. En este contexto, el modelo predictivo utilizado demuestra su capacidad para mejorar la planificación, con resultados superiores a los obtenidos con técnicas tradicionales.

Asimismo, para el objetivo específico 3, la implementación del algoritmo de programación permitió secuenciar las cirugías de manera óptima, maximizando el uso de recursos y reduciendo los tiempos de espera. Comparado con estudios previos sobre algoritmos de optimización en hospitales, como los realizados por Cartes (2016), los resultados obtenidos en este estudio muestran una mejora del 80% en la eficiencia de la asignación de recursos. Aunque el enfoque metodológico difiere (Cartes utilizó GRASP y este estudio PuLP), ambos coinciden en la capacidad de los algoritmos para resolver problemas complejos de programación y mejorar significativamente la eficiencia operativa.

En referencia al objetivo específico 4, la interfaz de usuario permitió la centralización de datos clave, facilitando la consulta y actualización de información crítica para la programación de cirugías. En línea con teorías sobre diseño centrado en el usuario y sistemas de gestión hospitalaria, la interfaz mejoró significativamente la eficiencia operativa al reducir los tiempos de consulta y evitar errores de entrada de datos. El resultado obtenido es consistente con los principios de usabilidad y optimización de procesos que destacan la importancia de la centralización de la información en sistemas de gestión complejos como los hospitalarios.

Finalmente, respondiendo al objetivo general del estudio, el diseño e implementación de la herramienta informática para la programación de cirugías optimizó el proceso de manera integral, logrando una reducción aproximada del 81% en tiempos y costos. Este resultado se compara favorablemente con

estudios previos que utilizaron modelos de optimización en el sector salud. Mientras que Aristizábal y Londoño (2019) identificaron la falta de coordinación como un problema clave, el presente estudio introduce una solución integral que, además de coordinar el proceso, automatiza la programación. En conjunto, la herramienta muestra un impacto positivo al reducir la carga administrativa, mejorar la asignación de recursos y, en última instancia, optimizar la gestión hospitalaria.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Respecto al objetivo específico 1, el diagnóstico del proceso de programación de cirugías permitió identificar importantes ineficiencias en términos de tiempo y costos operativos. La implementación de la herramienta informática demostró ser altamente efectiva al reducir el tiempo total dedicado a la programación de 3347 minutos mensuales a 648.2 minutos, lo que representa una disminución del 80.6%. Esta reducción significativa permitió liberar a los residentes para que se concentren en tareas médicas más importantes, mejorando la eficiencia general del servicio de traumatología.

En relación con el objetivo específico 2, el análisis de datos históricos y la implementación del modelo Random Forest permitieron predecir la duración de las cirugías con una precisión aceptable, alcanzando un MSE de 1890.9136. A pesar de que el margen de error fue variable, el modelo se destacó como una herramienta útil para mejorar la gestión del tiempo quirúrgico y optimizar el uso de los recursos hospitalarios, proporcionando un apoyo valioso para la planificación quirúrgica.

Con respecto al objetivo específico 3, el algoritmo de programación de cirugías desarrollado resultó eficaz para secuenciar cirugías de manera óptima, tomando en cuenta la disponibilidad de recursos, la prioridad de los pacientes y la continuidad de los bloques quirúrgicos. Aunque el modelo mostró algunas limitaciones en la asignación múltiple de cirugías dentro de un turno, mejoró el

flujo de trabajo en el hospital, demostrando su capacidad para optimizar la programación de manera sistemática.

Finalmente, en cuanto al objetivo específico 4, la interfaz de usuario diseñada facilitó significativamente el proceso de programación de cirugías. La integración del modelo de predicción en Excel mediante xlwings permitió que los usuarios ingresaran datos y obtuvieran predicciones de manera inmediata, lo que resultó en una drástica reducción de tiempos. Esta interfaz permitió que los residentes realicen sus tareas de manera más rápida y eficiente, liberando tiempo para la atención directa de los pacientes.

En resumen, la herramienta informática implementada ha demostrado su efectividad en la optimización del proceso de programación de cirugías, con una reducción significativa en los tiempos y costos operativos. Este estudio sienta las bases para futuras mejoras y expansión de la herramienta en el sector salud, maximizando el uso de recursos y mejorando la calidad del servicio médico.

7.2. Recomendaciones

- **Diagnóstico del proceso de programación de cirugías:** para mantener la optimización lograda en el proceso de programación de cirugías, se recomienda implementar un sistema de evaluación y monitoreo continuo. Este sistema permitirá revisar periódicamente los tiempos y costos operativos, ajustando el modelo según sea necesario. El monitoreo proactivo garantizará que se mantenga la eficiencia obtenida y permitirá

identificar áreas de mejora de manera oportuna, asegurando que la herramienta continúe siendo efectiva en el largo plazo.

- **Predicción de la duración de cirugías:** la herramienta informática debe integrarse con otros sistemas de gestión hospitalaria para facilitar la transferencia de datos y mejorar la eficiencia operativa. Además, es fundamental realizar sesiones de capacitación para el personal médico y administrativo, asegurando el correcto uso de la herramienta y maximizando sus beneficios. Mantener la herramienta actualizada con las últimas tecnologías y metodologías de optimización garantizará su efectividad continua y permitirá que se adapten a las necesidades cambiantes del hospital.
- **Implementación del algoritmo de programación de cirugías:** para continuar optimizando el modelo de programación de cirugías, se recomienda refinar el modelo agregando restricciones adicionales que aborden situaciones específicas del hospital, como requerimientos quirúrgicos más detallados o la gestión de recursos en tiempo real. Además, sería beneficioso formalizar el código utilizando una herramienta o librería más potente, como CPLEX o Gurobi, para manejar problemas de mayor complejidad y mejorar el rendimiento del algoritmo. También se puede explorar la integración de técnicas de *machine learning* para optimizar la secuenciación de cirugías de manera adaptativa, permitiendo al modelo ajustarse a condiciones cambiantes del hospital.
- **Evaluación de la interfaz de usuario:** a pesar de que la interfaz ha centralizado la consulta de datos, se recomienda mejorar y potenciar la

interfaz creando una base de datos integrada y más automatizada. Esto permitirá que la inscripción y actualización de pacientes en la lista de espera, así como la gestión de recursos, sea más eficiente y menos dependiente de procesos manuales. La automatización de estas funciones permitirá una mayor precisión y reducirá aún más los tiempos asociados a la programación, mejorando la efectividad de la herramienta.

- **Implementación de la herramienta informática:** Se sugiere extender el modelo a otros departamentos del hospital. La optimización de la programación de otros tipos de procedimientos quirúrgicos o servicios hospitalarios podría generar beneficios similares a los obtenidos en el servicio de traumatología. Fomentar la investigación continua y el desarrollo de nuevas tecnologías en el área de optimización de procesos hospitalarios permitirá seguir mejorando la eficiencia y la gestión de recursos en más áreas del hospital.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpaydin, E. (2020). *Introduction to Machine Learning*. (4ª ed.). MIT Press.
- Añasco Noguera, J., Cobo Larrahondo, Y. F., Martínez Caicedo, A. E., Osorio Cuellar, G. V., & Granada Aguirre, L. F. (2021). *Sistemas de información de salud en Colombia*. *Interdisciplinary Journal of Epidemiology and Public Health*, 4(1).
<https://doi.org/10.18041/2665-427x/ijeph.1.7906>
- Aristizábal, M., & Londoño, M. (2019). *Modelo de programación de cirugías electivas en una IPS del Centro del Valle del Cauca*. Universidad del Valle.
- Banerjee, S. (2014). *Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications*. (2ª ed.). CRC Press.
- Bono Cabré, R. (2012). *Diseños cuasiexperimentales y longitudinales*. Universidad de Barcelona.
- Cartes Rubilar, I. (2016). *Algoritmo GRASP para la Programación de Cirugías Electivas en un Hospital Público Chileno*. Universidad de Concepción.
- Kohnenkampf, R., Rocco C., Ortega B. (2021). *Optimización de los procesos de gestión en cirugía electiva*. *Revista Chilena de Anestesia*, 50(3), 455–462.
<https://doi.org/10.25237/REVCHILANESTV50N03-05>
- Gamboa, A., Rodriguez, M. (2017). *Diseño de un Modelo de Programación para Servicio Salas de Cirugía*. Universidad Sergio Arboleda.
- Hernández, Vanessa. (2020). *Metodología para estandarizar el proceso de programación de salas de cirugía*. Universidad de Medellín.
- Louridas, Panos (2020). *Algorithms*. The MIT Press Essential Knowledge Series.

- McCarthy, R. V. (2021). *Applying predictive analytics: Finding value in data*. [ZLibrary].
Recuperado de <https://zlibrary.to/dl/applying-predictive-analytics-finding-value-in-data>
- Messac, A. (2015). *Optimization in Practice with MATLAB: For Engineering Students and Professionals*. Cambridge University Press.
- Ministerio de Salud del Perú. (2013). *Indicadores de Gestión y Evaluación Hospitalaria, para hospitales, institutos y DIRESA*.
- O'Regan, G. (2017). *Concise Guide to Software Engineering: From Fundamentals to Application Methods*. Undergraduate Topics in Computer Science.
- Peña, S. (2017). *Análisis de Datos*. Editorial Areandino. <http://www.areandina.edu.co>
- Pérez, Rodrigo (2019). *Introducción a los Modelos de Optimización*. Universidad Piloto de Colombia.
- Ríos, Francisco. (2023). *Planificación de cirugías electivas considerando afinidad y preferencias en el equipo quirúrgico*. Universidad de Concepción.
- Saavedra Moreno, C., & Castaño, F. (2018). *Evaluación de reglas de prioridad para la programación de cirugías en ambientes con limitada disponibilidad de recursos*. Scientia et Technica Año XXII, 23(01).
- Soto, Ayuso. (2023). *Diseño de la distribución de quirófanos entre unidades quirúrgicas mediante modelos de programación lineal entera*. Universidad de Sevilla.
- Zambrano, Lourdes. (2015). *Contribución al mejoramiento de la productividad en el proceso de programación de cirugías de un hospital privado de la ciudad de Guayaquil*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

ANEXOS

ANEXO A. Generación de Base de Datos para Cirugía Electiva

Date	SOP	Especialidad	Agrupacion_edades	Edad	Sexo	HCL	Dx	Cx	Duracion de Cx
20230103	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	74	F	8940114	FRACTURA DE OLECRANON IZQUIERDO	RAFI DE CUBITO PROXIMAL	76
20230103	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	23	M	46690827	PSEUDOARTROSIS DE HUMERO IZQUIERDO	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/C	205
20230103	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	22	M	76651034	FRACTURA DE HALLUX IZQUIERDO	RAFI DE FALANGE/MTC/MTT	40
20230103	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	22	M	76651034	FRACTURA DE CUPULA RADIAL DERECHA	RAFI DE CABEZA RADIAL	118
20230104	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	83	M	20521970	FRACTURA INTERTROCANTERICA DERECHA	RAFI DE CADERA	68
20230104	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	47	F	10231572	FRACTURA OBLICUA DE TIBIA IZQUIERDA	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	127
20230104	4	TRAUMATOLOGIA	ADOLESCENTES	18	M	61169759	FRACTURA DE CLAVICULA DIAFISIARIA DE RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO		56
20230104	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	24	M	75512271	FRACTURA DE DIAFISIS DE TIBIA DERECHA	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	203
20230105	1	TRAUMATOLOGIA	ADOLESCENTES	17	M	71422697	OSTEOCONDROMA 1 ER DEDO PIE DERECH	CIRUGIA AMBULATORIA	20
20230105	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	44	M	10754224	RUPTURA DE TENDON DE AQUILES	TENORRAFIA DE AQUILES	87
20230105	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	59	F	80584866	FRACTURA BIMALEOLAR IZQUIERDO	RETIRO DE IMPLANTE	48
20230106	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	79	F	7689991	FRACTURA INTERTROCANTERICA DERECHA	RAFI DE CADERA	71
20230106	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	63	F	33720240	COXARTROSIS IZQUIERDA	ARTROPLASTIA DE CADERA	120
20230106	4	TRAUMATOLOGIA	ADOLESCENTES	15	M	61186819	EPIFISIOLISIS RADIO DISTAL IZQUIERDA	RAFI DE RADIO DISTAL	20
20230106	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	64	F	10590857	FRACTURA DE FEMUR DISTAL IZQUIERDO	RAFI DE FEMUR DISTAL	166
20230107	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	47	M	9531437	FRACTURA DE PLATILLO TIBIAL DERECHO	RAFI DE TIBIA PROXIMAL	125
20230107	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	47	M	9531437	FRACTURA DE ROTULA IZQUIERDA	RAFI DE ROTULA	134
20230107	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	35	M	48938455	FRACTURA DE TIBIA Y PERONE DISTAL	RAFI DE TIBIA DISTAL	244
20230110	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	49	M	10014554	FRACTURA DE CALCANEOS DERECHO	RAFI DE CALCANEOS	172
20230110	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	50	F	9687758	FRACTURA DE RADIO DISTAL IZQUIERDO	RAFI DE RADIO DISTAL	66
20230110	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	55	M	924688	ABCESO CUTANEO 5 DEDO MANO DERECH	AMPUTACION DE DEDO	57
20230110	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	40	M	43249322	FRACTURA DE CALCANEOS IZQUIERDO	RAFI DE CALCANEOS	119
20230111	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	60	F	10337310	FRACTURA EXPUESTA DE TIBIA DISTAL IZQUIERDA	RAFI DE TIBIA DISTAL	143
20230111	4	TRAUMATOLOGIA	ADOLESCENTES	14	M	62427328	FRACTURA DE CUBITO Y RADIO DIAFISIARIA	RAFI DE ANTEBRAZO	70
20230111	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	56	F	8948469	FRACTURA BIMALEOLAR DE TOBILLO DERECH	RAFI DE TOBILLO	70
20230112	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	41	M	40914211	RUPTURA DE TENDON DE AQUILES IZQUIERDO	TENORRAFIA DE AQUILES	36
20230112	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	45	M	45268881	RUPTURA DE TENDON DE AQUILES IZQUIERDO	TENORRAFIA DE AQUILES	94
20230112	1	TRAUMATOLOGIA	ADOLESCENTES	13	M	61812688	COMPLICACION IMPLANTE METALICO DE RETIRO DE IMPLANTE		12
20230113	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	50	F	09691860	LUXOFRACTURA DE GALEAZZI IZQUIERDO	RAFI DE ANTEBRAZO	105
20230113	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	56	M	1923561	FRACTURA DE ROTULA DERECHA	RAFI DE ROTULA	114
20230113	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	25	F	73439682	FRACTURA MALEOLO EXTERNO TOBILLO IZQUIERDO	RAFI DE TOBILLO	77
20230113	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	67	F	28822592	COXARTROSIS DERECHA	ARTROPLASTIA DE CADERA	119
20230114	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	60	M	8945264	FRACTURA DE HUMERO PROXIMAL IZQUIERDO	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/C	163
20230114	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	67	F	80073540	FRACTURA INTERTROCANTERICA DERECHA	RAFI DE CADERA	77
20230209	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	28	M	76644254	RUPTURA DE TENDON DE AQUILES	TENORRAFIA DE AQUILES	81
20230209	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	43	M	0	REVISION DE RUPTURA TENDON DE AQUIL	COLGAJO DE DEDO/MANO	199
20230210	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	28	M	48475864	FRACTURA TIBIA IZQUIERDA	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	110
20230210	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	44	M	45926193	FX DE CLAVICULA DERECHA	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	52
20230210	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	23	M	79636778	FRACTURA MALEOLO EXTERNO TOBILLO IZQUIERDO	RAFI DE TOBILLO	68
20230211	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	37	F	43237018	FRACTURA ESPIROIDEA DE TIBIA DERECHA	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	68
20230211	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	47	F	40476833	FRACTURA DE TOBILLO DERECHO	RAFI DE TOBILLO	63
20230211	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	62	M	6190725	OSTEOMIELITIS DE CADERA IZQUIERDA	CIRUGIA RECONSTRUCTIVA	135
20230214	4	TRAUMATOLOGIA	NINIOS	4	M	91116161	OSTEOMIELITIS DE TIBIA DERECHA	CIRUGIA RECONSTRUCTIVA	105
20230214	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	71	M	20542381	INSUFICIENCIA ARTERIAL MID	AMPUTACION SUPRACONDILEA	54
20230214	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	28	M	72542005	FRACTURA DE CUPULA RADIAL DERECHA	RAFI DE CABEZA RADIAL	183
20230214	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	28	M	72542005	FRACTURA DIAFISIARIA DE CUBITO DERECH	RAFI DE ANTEBRAZO	183
20230215	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	40	F	43311247	FRACTURA DIAFISIARIA DE TIBIA IZQUIERDA	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	219
20230215	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	68	F	3580379	FRACTURA MALEOLO EXTERNO TOBILLO IZQUIERDO	RAFI DE TOBILLO	72
20230215	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	35	F	44544211	FRACTURA DIAFISIARIA DE FEMUR DERECH	RAFI DE FEMUR DIAFISIARIO	130
20230217	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	64	F	745250042	LUXOFRACTURA TRIMALEOLAR TOBILLO IZQUIERDO	RAFI DE TOBILLO	197
20230217	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	34	M	45502017	LUXACION ACROMIO CLAVICULAR DERECHA	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	75
20230217	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	70	F	8966764	FRACTURA INTERTROCANTERICA IZQUIERDA	RAFI DE CADERA	68
20230218	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	21	M	74579674	FRACTURA DIAFISIARIA SEGMENTARIA DE	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	155
20230218	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	48	M	80036104	FRACTURA DE FALANGE MEDIA 3ER DEDO	RAFI DE FALANGE/MTC/MTT	56
20230218	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	35	M	44696391	FRACTURA DE HUMERO DISTAL DERECHO	RAFI DE HUMERO DISTAL	210
20230221	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	57	F	7314847	FRACTURA DE CLAVICULA IZQUIERDA	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	80
20230221	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	39	M	42093768	RUPTURA DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR	ARTROSCOPIA	202
20230221	7	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	38	F	42623586	INFECCION DE HERIDA OPERATORIA RODILLO	LIMPIEZA QUIRURGICA	203
20230222	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	29	M	47980719	LUXACION ACROMIOCLAVICULAR IZQUIERDA	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	73
20230222	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	30	F	61369407	FRACTURA BIMALEOLAR DE TOBILLO DERECH	RAFI DE TOBILLO	101
20230222	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	82	M	745212743	FRACTURA DE MALEOLO EXTERNO DERECH	RAFI DE TOBILLO	120
20230223	1	TRAUMATOLOGIA	INFANTES	0	F	92824045	PIE BOTT	TENOTOMIA DE AQUILES	15
20230223	1	TRAUMATOLOGIA	INFANTES	2	M	92096520	PIE BOTT	TENOTOMIA DE AQUILES	19
20230223	1	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	34	M	45036391	LESION DE PUNTA DE DEDOS 4 Y 4 MANO IZQUIERDA	COLGAJO DE DEDO/MANO	110
20230224	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	60	F	745198277	FRACTURA DE CUELLO DE FEMUR DERECH	ARTROPLASTIA DE CADERA	128
20230224	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	75	F	10447675	FX INTERTROCANTERICA DERECHA	RAFI DE CADERA	48
20230224	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	47	M	7894228	LUXOFRACTURA DE METATARSIANOS PIE IZQUIERDA	RAFI DE FALANGE/MTC/MTT	51
20230224	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	23	M	73701289	FRACTURA DIAFISIARIA FEMUR IZQUIERDA	RAFI DE FEMUR DIAFISIARIO	124
20230225	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	24	M	71454100	RIGIDEZ RODILLA DERECHA FLEXION	ARTROSCOPIA	249
20230225	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS MAYORES	73	F	9042475	FRACTURA DE ROTULA DERECHA	RAFI DE ROTULA	87
20230225	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	44	M	40235086	FRACTURA DE PLATILLO TIBIAL IZQUIERDO	ARTROSCOPIA	166
20230228	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	33	M	46061483	LUXACION ACROMIOCLAVICULAR IZQUIERDA	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	71
20230228	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	27	M	24538939	FRACTURA DIAFISIARIA DE RADIO Y CUBITO	RAFI DE ANTEBRAZO	195
20230228	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS JOVENES	21	M	70605180	LUXACION ACROMIOCLAVICULAR IZQUIERDA	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	94
20230228	4	TRAUMATOLOGIA	ADULTOS	52	F	9507589	FRACTURA CLAVICULA DISTAL	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIO	91

ANEXO B. Código de Correlación y Mapa de Calor en Python

```
Correlacion DB.py X
Python Scripts > Correlacion DB.py > ...
1  import pandas as pd
2  import seaborn as sns
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  # Asegúrate de que tus datos están cargados y preparados
6  datos_cirugias = pd.read_excel('Cirugias Historicas.xlsx', sheet_name='DB')
7  datos_cirugias['Date'] = pd.to_datetime(datos_cirugias['Date'], format='%Y%m%d')
8  datos_cirugias['Sexo_num'] = datos_cirugias['Sexo'].map({'M': 1, 'F': 0})
9  datos_numericos = datos_cirugias[['Edad', 'Duracion de Cx', 'Sexo_num']]
10
11 # Calcular la matriz de correlación
12 correlaciones = datos_numericos.corr()
13
14 # Imprimir la matriz de correlación
15 print(correlaciones)
16
17 # Visualización: Heatmap de las correlaciones
18 plt.figure(figsize=(10, 8))
19 sns.heatmap(correlaciones, annot=True, cmap='coolwarm', fmt=".2f")
20 plt.title('Matriz de Correlación de Cirugías Históricas')
21 plt.show()
22
```

ANEXO C. Código de Correlación con Gráficos de Caja

```
Correlacion_2.py X
Python Scripts > Correlacion_2.py > ...
1  import pandas as pd
2  import seaborn as sns
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  # Cargar datos
6  datos_cirugias = pd.read_excel('Cirugias Historicas.xlsx', sheet_name='DB')
7
8  # Preparación básica
9  datos_cirugias['Sexo_num'] = datos_cirugias['Sexo'].map({'M': 1, 'F': 0})
10
11 # Relación entre tipo de Cirugía y Duración de la Cirugía
12 plt.figure(figsize=(12, 6))
13 sns.boxplot(x='Cx', y='Duracion de Cx', data=datos_cirugias)
14 plt.xticks(rotation=45)
15 plt.title('Distribución de la Duración de Cirugía por Tipo de Cirugía')
16 plt.show()
17
18 # Relación entre Agrupación de Edades y Duración de la Cirugía
19 plt.figure(figsize=(12, 6))
20 sns.boxplot(x='Agrupacion_edades', y='Duracion de Cx', data=datos_cirugias)
21 plt.xticks(rotation=45)
22 plt.title('Distribución de la Duración de Cirugía por Grupo de Edad')
23 plt.show()
24
25 # Relación entre Sexo y Duración de la Cirugía
26 plt.figure(figsize=(8, 6))
27 sns.boxplot(x='Sexo', y='Duracion de Cx', data=datos_cirugias)
28 plt.title('Distribución de la Duración de Cirugía por Sexo')
29 plt.show()
```

ANEXO D. Código de Prueba ANOVA

Prueba ANOVA.py X

Python Scripts > Prueba ANOVA.py > ...

```
1  import pandas as pd
2  import scipy.stats as stats
3
4  # Cargar datos
5  datos_cirugias = pd.read_excel('Cirugias Historicas.xlsx', sheet_name='DB')
6
7  # Asumiendo que 'datos_cirugias' es tu DataFrame
8  # ANOVA para Tipo de Cirugía
9  grupos_cx = datos_cirugias.groupby('Cx')['Duracion de Cx'].apply(list)
10 f_value, p_value = stats.f_oneway(*grupos_cx)
11 print(f"ANOVA para Tipo de Cirugía: F={f_value}, p={p_value}")
12
13 # ANOVA para Agrupación de Edades
14 grupos_edad = datos_cirugias.groupby('Agrupacion_edades')['Duracion de Cx'].apply(list)
15 f_value, p_value = stats.f_oneway(*grupos_edad)
16 print(f"ANOVA para Agrupación de Edades: F={f_value}, p={p_value}")
17
18 # ANOVA para Sexo
19 grupos_sexo = datos_cirugias.groupby('Sexo')['Duracion de Cx'].apply(list)
20 f_value, p_value = stats.f_oneway(*grupos_sexo)
21 print(f"ANOVA para Sexo: F={f_value}, p={p_value}")
```

ANEXO E. Código Random Forest para la Predicción de Duración de Cirugías

```

Random Forest v2.py X
Python Scripts > Random Forest v2.py > ...
1  import pandas as pd
2  import numpy as np
3  from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
4  from sklearn.model_selection import RandomizedSearchCV
5  from sklearn.metrics import mean_squared_error
6  from sklearn.preprocessing import LabelEncoder
7  from joblib import dump
8
9  # Cargar datos
10 datos_cirugias = pd.read_excel('Cirugias Historicas.xlsx', sheet_name='DB')
11
12 # Codificación de variables categóricas con LabelEncoders separados
13 label_encoder_cx = LabelEncoder()
14 datos_cirugias['Cx_encoded'] = label_encoder_cx.fit_transform(datos_cirugias['Cx'])
15
16 label_encoder_ages = LabelEncoder()
17 datos_cirugias['Agrupacion_edades_encoded'] = label_encoder_ages.fit_transform(datos_cirugias['Agrupacion_edades'])
18
19 datos_cirugias['Sexo_num'] = datos_cirugias['Sexo'].map({'M': 1, 'F': 0})
20
21 # Preparación de datos
22 X = datos_cirugias[['Cx_encoded', 'Agrupacion_edades_encoded', 'Sexo_num', 'Edad']]
23 y = datos_cirugias['Duracion de Cx']
24
25 # Definir el espacio de parámetros para RandomizedSearchCV
26 param_dist = {
27     'n_estimators': np.arange(100, 1001, 100),
28     'max_features': ['sqrt', 'log2', None],
29     'max_depth': np.arange(10, 101, 10),
30     'min_samples_split': np.arange(2, 11),
31     'min_samples_leaf': np.arange(1, 11)
32 }
33
34 # Configurar el modelo para RandomizedSearchCV
35 rf = RandomForestRegressor(random_state=42)
36 random_search = RandomizedSearchCV(estimator=rf, param_distributions=param_dist,
37                                     n_iter=100, cv=10, verbose=2, random_state=42, n_jobs=-1)
38
39 # Ejecutar RandomizedSearchCV
40 random_search.fit(X, y)
41
42 # Mejores parámetros y modelo
43 print("Mejores parámetros encontrados: ", random_search.best_params_)
44 best_rf = random_search.best_estimator_
45
46 # Evaluación usando el mejor modelo
47 y_pred = best_rf.predict(X)
48 mse = mean_squared_error(y, y_pred)
49 print(f"El MSE del mejor modelo es: {mse}")
50
51 # Guardar el modelo Random Forest y los LabelEncoders
52 dump(best_rf, 'modelo_rf.joblib')
53 dump(label_encoder_cx, 'label_encoder_cx.joblib')
54 dump(label_encoder_ages, 'label_encoder_ages.joblib')
55

```

ANEXO F. Código de Integración con xlwings

```

prediction.py X
Python Scripts > prediction.py > ...
1  import pandas as pd
2  from joblib import load
3  import xlwings as xw
4
5  @xw.func
6  def predecir_duracion_cirugia(edad, sexo, cx_nombre, agrupacion_edades):
7      try:
8          # Carga del modelo y label encoders
9          modelo_rf = load(r'C:\Users\User\Documents\Python Scripts\modelo_rf.joblib')
10         label_encoder_cx = load(r'C:\Users\User\Documents\Python Scripts\label_encoder_cx.joblib')
11         label_encoder_ages = load(r'C:\Users\User\Documents\Python Scripts\label_encoder_ages.joblib')
12
13         # Preparación de los datos de entrada
14         sexo_num = 1 if sexo == 'M' else 0
15         cx_encoded = label_encoder_cx.transform([cx_nombre])[0]
16         agrupacion_edades_encoded = label_encoder_ages.transform([agrupacion_edades])[0]
17
18         # Crear DataFrame para la predicción, asegurándose de que el orden es el correcto
19         data = pd.DataFrame({
20             'Cx_encoded': [cx_encoded],
21             'Agrupacion_edades_encoded': [agrupacion_edades_encoded],
22             'Sexo_num': [sexo_num],
23             'Edad': [edad]
24         })
25
26         # Predecir la duración
27         duracion_predicha = modelo_rf.predict(data)[0]
28         return duracion_predicha
29     except Exception as e:
30         return f"Error: {str(e)}"
31
32 # Asegúrate de probar este script directamente en Python antes de usarlo en Excel con xlwings

```

ANEXO G. Código de Optimización con PuLP en Python

```
MILP v7 Pulp.py X
Python Scripts > MILP v7 Pulp.py > ...
1 import pandas as pd
2 from datetime import datetime
3 import pulp
4 from pulp import LpMaximize, LpProblem, LpVariable, lpSum, LpBinary, LpInteger, value
5 import numpy as np
6
7 # Carga de datos desde Excel, asegurando que las fechas se parseen correctamente
8 ruta_excel = r"C:\Users\User\Documents\Python Scripts\Base PELM - versión original.xlsm"
9 pacientes_df = pd.read_excel(ruta_excel, sheet_name='Pacientes', dtype={'HCL': str})
10 periodos_df = pd.read_excel(ruta_excel, sheet_name='Periodos de tiempo')
11 # Parsear fechas directamente con date_format
12 medicos_df = pd.read_excel(ruta_excel, sheet_name='Medicos', converters={'Fecha': lambda x: pd.to_datetime(x, format='%Y%m%d')}, dtype={'ID': str})
13 capacidades_df = pd.read_excel(ruta_excel, sheet_name='Capacidades', dtype={'ID Medico': str})
14 salas_df = pd.read_excel(ruta_excel, sheet_name='Salas', converters={'Fecha': lambda x: pd.to_datetime(x, format='%Y%m%d')})
15
16 #PASO 2: TRANSFORMACIÓN DE DATOS
17
18 #Pacientes
19 pacientes_df['Bloques_Necesarios'] = (pacientes_df['Duracion de Cx'] / 30).apply(np.ceil).astype(int)
20 pacientes_df['Prioridad_Inversa'] = 1 / pacientes_df['Prioridad de Cx']
21
22 #Periodos de tiempo: no hay transformaciones necesarias
23
24 #Medicos
25 medicos_df['Fecha'] = medicos_df['Fecha'].dt.date
26 medicos_df['Fecha_Turno'] = medicos_df['Fecha'].astype(str) + '_' + medicos_df['Turno'].astype(str)
27 disponibilidad_medicos = medicos_df.groupby('ID')['Fecha_Turno'].apply(list).to_dict()
28
29 #Capacidades
30 capacidades_dict = capacidades_df.groupby('ID Medico')['Cx'].apply(list).to_dict()
31
32 #Salas
33 salas_df['Fecha_Turno'] = salas_df['Fecha'].astype(str) + '_' + salas_df['Turno'].astype(str)
34 salas_df['Arco_en_C'] = salas_df['Arco en C'].astype(int)
35 disponibilidad_salas = salas_df.set_index('Fecha_Turno').to_dict(orient='index')
36
37 # Crear diccionarios para acceso rápido (caso parametro c_ps)
38 necesidad_arco_paciente = pacientes_df.set_index('HCL')['Necesidad Arco en C'].to_dict()
39 disponibilidad_arco_sala = salas_df.set_index('ID SOP')['Arco en C'].to_dict()
40
41 # Crear un diccionario que mapee turnos a sus periodos correspondientes (agregado 16-05 10:00 pm)
42 turnos_periodos = {}
43 for index, row in periodos_df.iterrows():
44     turno = row['Turno']
45     if turno not in turnos_periodos:
46         turnos_periodos[turno] = []
47     turnos_periodos[turno].append(row['ID Periodo'])
```

```

48
49 # PASO 3: DEFINICIÓN DEL MODELO EN PULP
50
51 # Creación del solver
52 solver = LpProblem("Cirugia_Optimizacion", LpMaximize)
53
54 # Creación de índices
55 pacientes_indices = pacientes_df['HCL'].unique().tolist()
56 salas_indices = salas_df['ID SOP'].unique().tolist()
57 dias_indices = salas_df['Fecha'].dt.date.unique().tolist() # Uso directo del campo de fecha
58 turnos_indices = periodos_df['Turno'].unique().tolist()
59 periodos_indices = periodos_df['ID Periodo'].unique().tolist()
60
61 # Suponiendo que los grupos médicos son definidos por combinaciones únicas de disponibilidad médica:
62 # Asumiendo que medicos_df tiene columnas 'Fecha' y 'Turno' además de 'ID' para los médicos
63 grupos_medicos_indices = []
64 for fecha_turno, group_df in medicos_df.groupby(['Fecha', 'Turno']):
65     fecha, turno = fecha_turno
66     grupos = tuple(sorted(group_df['ID'].unique())) # Ordena y convierte en tupla
67     # Crea un índice que incluya la fecha y el turno
68     grupos_medicos_indices.append((grupos, fecha, turno))
69
70 # Definición de parámetros
71
72 # Disponibilidad de grupos médicos
73 a_gbtd = {}
74 for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
75     for b in turnos_periodos[turno_grupo]: # Solo considerar los bloques válidos para el turno
76         fecha_turno = f'{fecha_grupo}_{turno_grupo}'
77         grupo_disponible = all(fecha_turno in disponibilidad_medicos.get(m, []) for m in g)
78         a_gbtd[(g, b, turno_grupo, fecha_grupo)] = 1 if grupo_disponible else 0
79
80 # Duración estimada de la cirugía para cada paciente, convertida a bloques de 30 minutos y redondeada al entero más cercano hacia arriba
81 tau_p = pacientes_df.set_index('HCL')['Duracion de Cx'].apply(lambda x: np.ceil(x / 30)).astype(int).to_dict()
82
83 # Disponibilidad de salas
84 s_sbtd = {}
85 for s in salas_indices:
86     for t in turnos_indices:
87         for d in dias_indices:
88             for b in turnos_periodos[t]: # Solo considerar los bloques válidos para el turno
89                 key = f'{d}_{t}'
90                 s_sbtd[(s, b, t, d)] = 1 if key in disponibilidad_salas and disponibilidad_salas[key]['ID SOP'] == s else 0
91
92 # Calcular c_ps
93 c_ps = {}
94 for p in pacientes_indices:
95     necesidad_arco = necesidad_arco_paciente[p]
96     for s in salas_indices:
97         disponibilidad_arco = disponibilidad_arco_sala[s]
98         c_ps[(p, s)] = 1 if necesidad_arco == disponibilidad_arco else 0
99
100 # Capacidad de los grupos médicos para realizar las cirugías
101 k_pg = {}
102 for g, fecha, turno in grupos_medicos_indices: # Asumiendo que grupos_medicos_indices ahora incluye grupos de forma correcta
103     for p in pacientes_indices:
104         required_cx = pacientes_df.loc[ pacientes_df['HCL'] == p, 'Cx'].iat[0] # Asegura tomar el primer valor
105         grupo_tiene_capacidad = False
106         for m in g: # Aquí g debería ser una tupla de IDs de médicos únicamente
107             capacidades_medico = capacidades_dict.get(m, [])
108             if required_cx in capacidades_medico:
109                 grupo_tiene_capacidad = True
110                 break
111         k_pg[(p, (g, fecha, turno))] = 1 if grupo_tiene_capacidad else 0
112
113
114 # Nivel de prioridad del paciente
115 pi_p = pacientes_df.set_index('HCL')['Prioridad_Inversa'].to_dict()
116
117 # Requerimiento del Arco en C
118 theta_p = pacientes_df.set_index('HCL')['Necesidad Arco en C'].to_dict()
119
120 #CODIGO NUEVO PARA DICCIONARIO AGREGADO EL 16-05 9:40 pm
121 from collections import defaultdict
122
123 # Crear un diccionario para almacenar días y turnos disponibles para cada paciente
124 dias_turnos_disponibles = defaultdict(list)
125
126 for p in pacientes_indices:
127     for d in dias_indices:
128         for t in turnos_indices:
129             for s in salas_indices:
130                 for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
131                     if d == fecha_grupo and t == turno_grupo:
132                         for b in turnos_periodos[t]:
133                             if (g, b, t, d) in a_gbtd and a_gbtd[(g, b, t, d)] == 1 and (s, b, t, d) in s_sbtd and s_sbtd[(s, b, t, d)] == 1:
134                                 dias_turnos_disponibles[p].append((d, t))
135                                 break
136
137

```

```

137 # Estos parámetros ahora se pueden usar en las definiciones
138 #de las restricciones para especificar las condiciones bajo las cuales se pueden tomar decisiones sobre la programación quirúrgica.
139
140 # Inicializar disponibilidad de bloques para cada día y turno
141 bloques_disponibles = {d: {t: list(turnos_periodos[t]) for t in turnos_indices} for d in dias_indices}
142
143 # Inicializar disponibilidad de salas y grupos médicos
144 salas_disponibles = {d: {t: list(salas_indices) for t in turnos_indices} for d in dias_indices}
145 grupos_medicos_disponibles = {d: {t: list(grupos_medicos_indices) for t in turnos_indices} for d in dias_indices}
146
147 # Función para obtener el valor de una expresión del solver
148 def obtener_valor(expr):
149     return int(expr.solution_value())
150
151 # Diccionarios para almacenar la disponibilidad final
152 disponibilidad_final_bloques = {}
153 disponibilidad_final_salas = {}
154 disponibilidad_final_grupos = {}
155
156 # Inicializar disponibilidad de bloques para cada día, turno, sala y grupo médico
157 disponibilidad_bloques = {d: {t: {s: {g: list(turnos_periodos[t]) for g, fecha, turno in grupos_medicos_indices}
158                                for s in salas_indices} for t in turnos_indices} for d in dias_indices}
159
160 # Función para actualizar disponibilidad
161 def actualizar_disponibilidad(p, d, t, fstart, fend, sala, grupo_medico):
162     fstart_val = fstart
163     fend_val = fend
164
165     # Eliminar los bloques asignados
166     for b in range(fstart_val, fend_val + 1):
167         if b in disponibilidad_bloques[d][t][sala][grupo_medico]:
168             disponibilidad_bloques[d][t][sala][grupo_medico].remove(b)
169
170     # Guardar disponibilidad final
171     disponibilidad_final_bloques[(d, t, sala, grupo_medico)] = disponibilidad_bloques[d][t][sala][grupo_medico]
172
173 # Variables de decisión
174 # Variables de decisión x_pgsbtd
175 x_pgsbtd = {}
176 for p in pacientes_indices:
177     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
178         for s in salas_indices:
179             for d in dias_indices:
180                 if d == fecha_grupo and turno_grupo in turnos_indices:
181                     for b in bloques_disponibles[d][turno_grupo]:
182                         x_pgsbtd[(p, g, s, d, turno_grupo, b)] = LpVariable(f'x_{p}_{g}_{s}_{d}_{turno_grupo}_{b}', cat=LpBinary)
183
184 # Variables de decisión y_psdtd
185 y_psdtd = {}
186 for p in pacientes_indices:
187     for s in salas_indices:
188         for d in dias_indices:
189             for t in turnos_indices:
190                 sala_disponible = any(b in bloques_disponibles[d][t] for b in turnos_periodos[t])
191                 if sala_disponible:
192                     y_psdtd[p, s, d, t] = LpVariable(f'y_{p}_{s}_{d}_{t}', cat=LpBinary)
193
194 # Variables de decisión para fstart_p y fend_p
195 fstart_p = {}
196 fend_p = {}
197 for p in pacientes_indices:
198     fstart_p[p] = LpVariable(f'fstart_{p}', lowBound=0, upBound=max(max(turnos_periodos[t]) for t in turnos_indices), cat=LpInteger)
199     fend_p[p] = LpVariable(f'fend_{p}', lowBound=0, upBound=max(max(turnos_periodos[t]) for t in turnos_indices), cat=LpInteger)
200
201
202 # Definición de restricciones
203 # Asegurar la continuidad de los bloques asignados dentro de cada paciente
204 for p in pacientes_indices:
205     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
206         for s in salas_indices:
207             for d in dias_indices:
208                 if d == fecha_grupo and turno_grupo in turnos_indices:
209                     bloques_disponibles_turno = bloques_disponibles[d][turno_grupo]
210                     for b in range(len(bloques_disponibles_turno) - tau_p[p] + 1):
211                         for k in range(tau_p[p] - 1):
212                             clave_curr = (p, g, s, d, turno_grupo, bloques_disponibles_turno[b + k])
213                             clave_next = (p, g, s, d, turno_grupo, bloques_disponibles_turno[b + k + 1])
214                             if clave_curr in x_pgsbtd and clave_next in x_pgsbtd:
215                                 solver += x_pgsbtd[clave_curr] >= x_pgsbtd[clave_next]
216

```

```

217 # Ahora procederíamos a definir las restricciones y la función objetivo basadas en las discusiones previas.
218 #Restricciones de asignaciones y capacidad
219
220 # Combinación de disponibilidad de grupo médico y sala
221 for p in pacientes_indices:
222     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
223         for s in salas_indices:
224             for d in dias_indices:
225                 if d == fecha_grupo:
226                     for t in turnos_indices:
227                         if t == turno_grupo:
228                             for b in bloques_disponibles[d][t]:
229                                 clave_x = (p, g, s, d, t, b)
230                                 clave_gbtd = (g, b, t, d)
231                                 clave_sbtd = (s, b, t, d)
232                                 if clave_x in x_pgsbtd:
233                                     if clave_gbtd in a_gbtd and clave_sbtd in s_sbtd:
234                                         solver += x_pgsbtd[clave_x] <= a_gbtd[clave_gbtd] * s_sbtd[clave_sbtd]
235
236 #FUNCIONA CORRECTAMENTE
237 # (2) A lo más un paciente por grupo, bloque, turno y día en una sala
238 for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
239     for d in dias_indices:
240         if d == fecha_grupo:
241             for t in turnos_indices:
242                 if t == turno_grupo:
243                     bloques_disponibles_turno = bloques_disponibles[d][t]
244                     for b in bloques_disponibles_turno:
245                         constraint = lpSum(
246                             x_pgsbtd[p, g, s, d, t, b]
247                             for p in pacientes_indices
248                             for s in salas_indices
249                             if (p, g, s, d, t, b) in x_pgsbtd
250                         ) <= 1
251                         solver += constraint
252
253
254 # (3) A lo más una cirugía por paciente en todos los días y turnos
255 print("Añadiendo restricciones para limitar a una cirugía por paciente en todos los contextos, sin considerar bloques específicos:")
256 for p in pacientes_indices:
257     constraint = lpSum(
258         y_psdtd[p, s, d, t]
259         for s in salas_indices
260         for d, t in dias_turnos_disponibles[p]
261         if (p, s, d, t) in y_psdtd
262     ) <= 1
263     solver += constraint
264 print("Restricción para una cirugía por paciente en todo el horizonte de programación añadida correctamente.")

```

```

266 # Restricción adicional: Un paciente por día y turno
267 print("Añadiendo restricciones para limitar a un paciente a una cirugía por día y turno...")
268 for p in pacientes_indices:
269     for d, t in dias_turnos_disponibles[p]:
270         bloques_disponibles_turno = bloques_disponibles[d][t]
271         constraint = lpSum(y_psd[t][p, s, d, t] for s in salas_indices if (p, s, d, t) in y_psd[t]) <= 1
272         solver += constraint
273
274     for s in salas_indices:
275         if (p, s, d, t) in y_psd[t]:
276             for g, fecha_grupo, turno_grupo in grupos_medicos_indices:
277                 if d == fecha_grupo and t == turno_grupo:
278                     for b in bloques_disponibles_turno:
279                         clave_x = (p, g, s, d, t, b)
280                         if clave_x in x_pgsbtd:
281                             solver += y_psd[t][p, s, d, t] >= x_pgsbtd[clave_x]
282 print("Restricción adicional procesada correctamente.")
283
284 # (4) Verificar capacidad del grupo médico
285 print("Añadiendo restricciones para verificar la capacidad del grupo médico:")
286 for p in pacientes_indices:
287     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
288         for s in salas_indices:
289             for d in dias_indices:
290                 if d == fecha_grupo:
291                     for t in turnos_indices:
292                         if t == turno_grupo:
293                             for b in bloques_disponibles[d][t]:
294                                 clave_x = (p, g, s, d, t, b)
295                                 clave_kpg = (p, (g, fecha_grupo, turno_grupo))
296                                 if clave_x in x_pgsbtd:
297                                     if clave_kpg in k_pg:
298                                         solver += x_pgsbtd[clave_x] <= k_pg[clave_kpg]
299 print("Restricciones de capacidad del grupo médico añadidas correctamente.")
300
301 # (5) A lo más un grupo médico y paciente en cada sala por bloque, turno y día
302 print("Añadiendo restricciones para limitar a un grupo médico y paciente por sala, bloque, turno y día:")
303 for s in salas_indices:
304     for d in dias_indices:
305         for t in turnos_indices:
306             for b in turnos_periodos[t]:
307                 variables_sum = [
308                     x_pgsbtd[p, g, s, d, t, b]
309                     for p in pacientes_indices
310                     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices
311                     if d == fecha_grupo and t == turno_grupo and (p, g, s, d, t, b) in x_pgsbtd
312                 ]
313                 if variables_sum:
314                     constraint = lpSum(variables_sum) <= 1
315                     solver += constraint
316 print("Restricciones para limitar un grupo médico y paciente por sala por bloque, turno y día añadidas correctamente.")
317
318 # Restricciones de continuidad y duración
319 # (6) Cumplimiento de la duración de la cirugía y necesidades específicas
320 print("Procesando restricciones para cumplimiento de la duración de la cirugía y necesidades específicas...")
321 for p in pacientes_indices:
322     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
323         for s in salas_indices:
324             for d in dias_indices:
325                 if d == fecha_grupo and turno_grupo in turnos_indices:
326                     bloques_disponibles_turno = bloques_disponibles[d][turno_grupo]
327                     variables_sum = []
328                     for b in bloques_disponibles_turno:
329                         clave = (p, g, s, d, turno_grupo, b)
330                         if clave in x_pgsbtd:
331                             variables_sum.append(x_pgsbtd[clave])
332                     if variables_sum:
333                         required_blocks = tau_p[p]
334                         clave_y = (p, s, d, turno_grupo)
335                         if clave_y in y_psd[t]:
336                             if c_ps.get((p, s), 0) == 1 and theta_p.get(p, 0) == 1:
337                                 solver += lpSum(variables_sum) == required_blocks * y_psd[clave_y]
338                             else:
339                                 solver += lpSum(variables_sum) == 0
340 print("Restricciones de duración procesadas correctamente.")

```

```

343 # (7) A lo más una asignación de sala por día y turno
344 print("Procesando restricciones para limitar a una asignación de sala por día y turno...")
345 for p in pacientes_indices:
346     for s in salas_indices:
347         for d in dias_indices:
348             for t in turnos_indices:
349                 clave = (p, s, d, t)
350                 if clave in y_psdtd:
351                     constraint = lpSum(
352                         y_psdtd[p, s, d, t]
353                         for t in turnos_indices
354                         if (p, s, d, t) in y_psdtd
355                     ) <= 1
356                 solver += constraint
357 print("Restricciones de asignación de sala procesadas correctamente.")
358
359
360 # (12-14) Integridad de las variables de decisión y rangos para fstart y fend
361 print("Estableciendo límites de las variables de decisión y rangos para variables de tiempo:")
362
363 for key in x_pgsbtd:
364     x_pgsbtd[key].bounds(0, 1)
365
366 for key in y_psdtd:
367     y_psdtd[key].bounds(0, 1)
368
369 # Variable de decisión para cada bloque no utilizado
370 unused_block_vars = {}
371 for d in dias_indices:
372     for t in turnos_indices:
373         for b in bloques_disponibles[d][t]:
374             unused_block_vars[(d, t, b)] = LpVariable(f'unused_{d}_{t}_{b}', cat=LpBinary)
375
376 # Añadir restricciones para minimizar los bloques no utilizados
377 for d in dias_indices:
378     for t in turnos_indices:
379         for b in bloques_disponibles[d][t]:
380             for p in pacientes_indices:
381                 for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
382                     for s in salas_indices:
383                         if d == fecha_grupo and t == turno_grupo:
384                             if (p, g, s, d, t, b) in x_pgsbtd:
385                                 solver += x_pgsbtd[(p, g, s, d, t, b)] <= 1 - unused_block_vars[(d, t, b)]
386
387 # Añadir las penalizaciones por bloques no utilizados y tiempos de inicio tardíos en la función objetivo
388 objective_terms = []
389 for p in pacientes_indices:
390     for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
391         for s in salas_indices:
392             for d in dias_indices:
393                 if d == fecha_grupo:
394                     for t in turnos_indices:
395                         if t == turno_grupo:
396                             for b in bloques_disponibles[d][t]:
397                                 if (p, g, s, d, t, b) in x_pgsbtd:
398                                     # Priorizar bloques disponibles más temprano dentro del turno
399                                     objective_terms.append(pi_p[p] * x_pgsbtd[(p, g, s, d, t, b)])
400                                     # Penalizar tiempos de inicio más tardíos
401                                     objective_terms.append(fstart_p[p] * 1)
402                                     # Penalizar tiempos de fin más tempranos (para evitar tiempos inactivos)
403                                     objective_terms.append(fend_p[p] * 1)
404
405 # Definir el objetivo del solver
406 solver += lpSum(objective_terms)
407

```

```

410 # Procesar resultados del solver
411 def procesar_resultados(solver, x_pgsbtd):
412     print("Ejecutando el solver...")
413     status = solver.solve()
414     print(f"Solver ejecutado, estado: {status}")
415
416     if status == pulp.LpStatusOptimal or status == pulp.LpStatusNotSolved:
417         print(f"Estado del solver: {'Óptimo' if status == pulp.LpStatusOptimal else 'Factible'}")
418
419         active_assignments = 0
420         patients_assigned = set()
421         assignments = []
422
423         fstart_values = {}
424         fend_values = {}
425
426         # Inicializar disponibilidad de bloques para cada día, turno, sala y grupo médico
427         disponibilidad_bloques = {d: {t: {s: {g: list(turnos_periodos[t]) for g, fecha, turno in grupos_medicos_indices}
428                                     for s in salas_indices}
429                                     for t in turnos_indices}
430                                     for d in dias_indices}
431
432         def actualizar_disponibilidad(p, d, t, fstart, fend, sala, grupo_medico):
433             fstart_val = fstart
434             fend_val = fend
435
436             # Eliminar los bloques asignados
437             for b in range(fstart_val, fend_val + 1):
438                 if b in disponibilidad_bloques[d][t][sala][grupo_medico]:
439                     disponibilidad_bloques[d][t][sala][grupo_medico].remove(b)
440
441             # Guardar disponibilidad final
442             disponibilidad_final_bloques[(d, t, sala, grupo_medico)] = disponibilidad_bloques[d][t][sala][grupo_medico]
443
444         for p in pacientes_indices:
445             for (g, fecha_grupo, turno_grupo) in grupos_medicos_indices:
446                 for s in salas_indices:
447                     for d in dias_indices:
448                         if d == fecha_grupo:
449                             for t in turnos_indices:
450                                 if t == turno_grupo:
451                                     bloques_asignados = []
452                                     for b in turnos_periodos[t]:
453                                         clave = (p, g, s, d, t, b)
454                                         if clave in x_pgsbtd and value(x_pgsbtd[clave]) > 0.5:
455                                             bloques_asignados.append(b)
456                                     if bloques_asignados:
457                                         fstart_val = min(bloques_asignados)
458                                         fend_val = max(bloques_asignados)
459                                         fstart_values[p] = fstart_val
460                                         fend_values[p] = fend_val
461                                         actualizar_disponibilidad(p, d, t, fstart_val, fend_val, s, g)
462                                         active_assignments += 1
463                                         patients_assigned.add(p)
464                                         assignments.append((p, d, t, fstart_val, fend_val))
465
466                                     # Verificar si aún hay disponibilidad en el turno actual
467                                     if any(b in disponibilidad_bloques[d][t][s][g] for b in turnos_periodos[t]):
468                                         continue # Seguir asignando en el mismo turno
469
470         print(f"Total de asignaciones activas detectadas: {active_assignments}")
471         if active_assignments > 0:
472             assignments_by_day = {}
473             for key in x_pgsbtd:
474                 if value(x_pgsbtd[key]) > 0.5:
475                     p, g, s, d, turno_grupo, b = key
476                     if d not in assignments_by_day:
477                         assignments_by_day[d] = []
478                     assignments_by_day[d].append((turno_grupo, s, p, g, b))

```

```

479
480
481     for day in sorted(assignments_by_day):
482         print(f"\nProgramación {day}:")
483         day_assignments = sorted(assignments_by_day[day], key=lambda x: (x[0], x[1], x[2]))
484         grouped_assignments = {}
485         for (t, s, p, g, b) in day_assignments:
486             key = (t, s, p, g)
487             if key not in grouped_assignments:
488                 grouped_assignments[key] = []
489             grouped_assignments[key].append(b)
490
491         for (t, s, p, g), blocks in grouped_assignments.items():
492             blocks = sorted(blocks)
493             print(f" Paciente {p} asignado en el turno {t} con el grupo médico {g} en la sala {s}, para los bloques: {' '.join(map(str, blocks))}.")
494
495         print(f"Total de asignaciones procesadas: {len(assignments_by_day)}")
496
497         print(f"\nNúmero de pacientes con cirugía asignada: {len(patients_assigned)}")
498         print("Pacientes asignados y su prioridad:")
499         for p in patients_assigned:
500             print(f" Paciente {p} con prioridad {pi_p[p]}")
501     else:
502         print("No se detectaron asignaciones activas tras la revisión.")
503 elif status == pulp.LpStatusInfeasible:
504     print("El modelo es infactible. Revisar restricciones.")
505 else:
506     print("Estado del solver desconocido.")
507
508 # Imprimir la disponibilidad final
509 print("\nDisponibilidad final de bloques por día y turno y sala:")
510 for d in dias_indices:
511     for t in turnos_indices:
512         for s in salas_indices:
513             for g, fecha, turno in grupos_medicos_indices:
514                 if g in disponibilidad_bloques[d][t][s]:
515                     bloques = disponibilidad_bloques[d][t][s][g]
516                     if len(bloques) < len(turnos_periodos[t]):
517                         print(f"Día {d}, Turno {t}, Sala {s}, Grupo Médico {g}: {bloques}")
518
519 # Llamar a la función para procesar los resultados
520 procesar_resultados(solver, x_pgsbtd)

```

ANEXO H. Pacientes en Lista de Espera para Cirugía

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	HCL	Edad	Sexo	Cx	Agrupacion edades	Prioridad de Cx	Duracion de Cx	Necesidad Arco en C	Fecha de Trauma
2	71802706	32 M		RAFI DE CADERA	ADULTOS JOVENES	3	126		1 20231029
3	42542797	39 M		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS JOVENES	2	82		1 20231029
4	71345862	18 M		RAFI DE TOBILLO	ADOLESCENTES	3	98		1 20231105
5	48388684	33 F		RAFI DE HUMERO DISTAL	ADULTOS JOVENES	1	153		1 20231105
6	9007325	70 F		RAFI DE CADERA	ADULTOS MAYORES	3	103		1 20231109
7	76644412	29 F		RAFI DE HUMERO DISTAL	ADULTOS JOVENES	3	156		1 20231114
8	8923434	71 M		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS MAYORES	2	101		1 20231114
9	61851576	14 M		RAFI DE TIBIA PROXIMAL	ADOLESCENTES	1	163		1 20231119
10	77226439	22 M		RAFI MULTIPLE	ADULTOS JOVENES	1	225		1 20231122
11	2395031	56 F		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS	2	91		1 20231127
12	70071009	29 M		RAFI DE ROTULA	ADULTOS JOVENES	1	113		1 20231130
13	73721523	31 F		RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	ADULTOS JOVENES	3	126		1 20231204
14	9280187	57 M		RAFI DE RADIO DISTAL	ADULTOS	2	133		1 20231203
15	3671615	47 F		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS	2	97		1 20231205
16	48151683	29 F		RAFI DE RADIO DISTAL	ADULTOS JOVENES	1	93		1 20231205
17	75152275	22 F		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS JOVENES	1	102		1 20231206
18	745226757	50 M		RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	ADULTOS	3	178		1 20231207
19	60653026	31 F		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS JOVENES	1	107		1 20231207
20	41470174	41 F		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS	1	115		1 20231207
21	70884775	29 F		RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	ADULTOS JOVENES	1	140		1 20231207
22	29546105	73 M		RAFI DE TOBILLO	ADULTOS MAYORES	1	111		1 20231208
23	9007816	70 F		RAFI DE CADERA	ADULTOS MAYORES	3	103		1 20231208
24	46884749	31 M		RAFI DE RADIO DISTAL	ADULTOS JOVENES	1	112		1 20231208
25	8916679	89 F		RAFI DE CADERA	ADULTOS MAYORES	1	91		1 20231209
26	72957492	23 M		RAFI DE ANTEBRAZO	ADULTOS JOVENES	3	91		1 20231209
27	40912924	42 F		RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	ADULTOS	1	133		1 20231221
28	10120011	54 F		RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	ADULTOS	2	142		1 20231219
29	40998135	42 M		RAFI DE ANTEBRAZO	ADULTOS	2	78		1 20231219
30	44909540	38 M		RAFI DE ANTEBRAZO	ADULTOS JOVENES	1	118		1 20231227

ANEXO I. Periodos de Tiempo Considerados en Cirugías

	A	B	C	D
1	ID Periodo ▼	Turno ▼	Inicio de periodo ▼	Fin de periodo ▼
2	1	1	08:00	08:30
3	2	1	08:30	09:00
4	3	1	09:00	09:30
5	4	1	09:30	10:00
6	5	1	10:00	10:30
7	6	1	10:30	11:00
8	7	1	11:00	11:30
9	8	1	11:30	12:00
10	9	1	12:00	12:30
11	10	1	12:30	13:00
12	11	1	13:00	13:30
13	12	1	13:30	14:00
14	13	2	14:00	14:30
15	14	2	14:30	15:00
16	15	2	15:00	15:30
17	16	2	15:30	16:00
18	17	2	16:00	16:30
19	18	2	16:30	17:00
20	19	2	17:00	17:30
21	20	2	17:30	18:00
22	21	2	18:00	18:30
23	22	2	18:30	19:00
24	23	2	19:00	19:30
25	24	2	19:30	20:00

ANEXO J. Disponibilidad de Médicos

	A	B	C	D
1	ID	Nombre	Fecha	Turno
2	21569475	ARENAS ROMAN HENRY	20240402	1
3	45159157	MARCHAN BRAVO FRANKLIN ESTEBAN	20240402	1
4	04652999	LAZO ALVAREZ JUAN CARLOS	20240402	2
5	02438928	MERCADO VEGA JUAN CARLOS	20240402	2
6	06812392	ESCATE LAZO FELIPE ADOLFO	20240403	1
7	46612203	RODRIGUEZ BERMUDEZ CHRISTIAN JESUS	20240403	1
8	46504395	DIAZ GUERRERO VICTOR ANIBAL	20240403	2
9	46612203	RODRIGUEZ BERMUDEZ CHRISTIAN JESUS	20240403	2
10	70432792	GUILLEN MORALES JULIO CESAR	20240404	1
11	41453005	VARGAS CHAVEZ FREDDY	20240404	1
12	09090502	CANAZAS PIZARRO JORGE	20240405	2
13	45159157	MARCHAN BRAVO FRANKLIN ESTEBAN	20240405	2
14	70675860	ALARCON MORAN SANDRA	20240405	1
15	42170586	MAMANI MAMANI JUAN CARLOS	20240405	1
16	43093763	GAYOSO CALONGOS IGOR ALEJANDRO	20240406	2
17	46211322	ZAMORA TALAVERANO EVA MARIA	20240406	2
18	45887993	GIL MENDEZ JOSE LUIS	20240406	1
19	46612203	RODRIGUEZ BERMUDEZ CHRISTIAN JESUS	20240406	1
20	21569475	ARENAS ROMAN HENRY	20240407	2
21	06812392	ESCATE LAZO FELIPE ADOLFO	20240407	2
22	45461325	ESPINOSA CONDE ERICK ANGEL PIER	20240407	1
23	70432792	GUILLEN MORALES JULIO CESAR	20240407	1
24	45887993	GIL MENDEZ JOSE LUIS	20240409	1
25	70432792	GUILLEN MORALES JULIO CESAR	20240409	1
26	70675860	ALARCON MORAN SANDRA	20240409	2
27	02438928	MERCADO VEGA JUAN CARLOS	20240409	2
28	45418679	MONROY COACALLA CHRISTIAN EMERSON	20240409	2
29	06812392	ESCATE LAZO FELIPE ADOLFO	20240410	1
30	45461325	ESPINOSA CONDE ERICK ANGEL PIER	20240410	1
31	09090502	CANAZAS PIZARRO JORGE	20240410	2
32	46504395	DIAZ GUERRERO VICTOR ANIBAL	20240410	2
33	45418679	MONROY COACALLA CHRISTIAN EMERSON	20240410	2
34	43244556	GARAY ROJAS FRANCISCO MARTIN	20240411	1
35	04652999	LAZO ALVAREZ JUAN CARLOS	20240411	1
36	70432792	GUILLEN MORALES JULIO CESAR	20240412	2
37	02438928	MERCADO VEGA JUAN CARLOS	20240412	2
38	45418679	MONROY COACALLA CHRISTIAN EMERSON	20240412	2
39	43093763	GAYOSO CALONGOS IGOR ALEJANDRO	20240412	1
40	45159157	MARCHAN BRAVO FRANKLIN ESTEBAN	20240412	1

ANEXO K. Capacidades de los Médicos

	A	B
1	ID Medico	Cx
2	70675860	AMPUTACION DE DEDO
3	70675860	AMPUTACION INFRACONDILEA
4	70675860	AMPUTACION SUPRACONDILEA
5	70675860	ARTROSCOPIA
6	70675860	CAMBIO DE VAC
7	70675860	CIRUGIA AMBULATORIA
8	70675860	CIRUGIA RECONSTRUCTIVA
9	70675860	COLGAJO DE DEDO/MANO
10	70675860	COLOCACION DE YESO PELVIPEDIO
11	70675860	DESVINCULACION DE CROSS FINGER
12	70675860	FIJACION EXTERNA
13	70675860	LIMPIEZA QUIRURGICA
14	70675860	RAFI DE ANTEBRAZO
15	70675860	RAFI DE CABEZA RADIAL
16	70675860	RAFI DE CADERA
17	70675860	RAFI DE CALCANEOS
18	70675860	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIOCLAVICULAR
19	70675860	RAFI DE CUBITO PROXIMAL
20	70675860	RAFI DE ESCAPULA
21	70675860	RAFI DE FALANGE/MTC/MTT
22	70675860	RAFI DE FEMUR DIAFISIARIO
23	70675860	RAFI DE FEMUR DISTAL
24	70675860	RAFI DE HUMERO DISTAL
25	70675860	RAFI DE HUMERO DISTAL PEDIATRICO
26	70675860	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO
27	70675860	RAFI DE RADIO DISTAL
28	70675860	RAFI DE ROTULA
29	70675860	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA
30	70675860	RAFI DE TIBIA DISTAL
31	70675860	RAFI DE TIBIA PROXIMAL
32	70675860	RAFI DE TOBILLO
33	70675860	RAFI MULTIPLE
34	70675860	RAFI OTROS
35	70675860	RETIRO DE IMPLANTE
36	70675860	RETIRO DE MATERIAL
37	70675860	TENORRAFIA DE AQUILES
38	70675860	TENORRAFIA/NEURORRAFIA DE MIEMBRO SUPERIOR
39	21569475	AMPUTACION DE DEDO
40	21569475	AMPUTACION INFRACONDILEA
41	21569475	AMPUTACION SUPRACONDILEA

ANEXO L. Disponibilidad de Salas y Arco en C

	A	B	C	D
1	ID SOP	Fecha	Turno	Arco en C
2	4	20240402	1	1
3	4	20240403	1	1
4	5	20240404	1	0
5	4	20240405	1	1
6	4	20240406	1	1
7	4	20240407	1	1
8	4	20240409	1	1
9	4	20240410	1	1
10	5	20240411	1	0
11	4	20240412	1	1
12	4	20240413	1	1
13	4	20240414	1	1
14	4	20240416	1	1
15	4	20240417	1	1
16	5	20240418	1	0
17	4	20240419	1	1
18	4	20240420	1	1
19	4	20240421	1	1
20	4	20240423	1	1
21	4	20240424	1	1
22	5	20240425	1	0
23	4	20240426	1	1
24	4	20240427	1	1
25	4	20240428	1	1
26	4	20240430	1	1
27	4	20240402	2	1
28	4	20240403	2	1
29	4	20240405	2	1
30	4	20240406	2	1
31	4	20240407	2	1
32	4	20240409	2	1
33	4	20240410	2	1
34	4	20240412	2	1
35	4	20240413	2	1
36	4	20240414	2	1
37	4	20240416	2	1
38	4	20240417	2	1
39	4	20240419	2	1
40	4	20240420	2	1
41	4	20240421	2	1

ANEXO M. Requerimiento de Arco en C en Cirugía Electiva

	A	B
1	Cx	Requiere Arco
2	AMPUTACION DE DEDO	0
3	AMPUTACION INFRACONDILEA	0
4	AMPUTACION SUPRACONDILEA	0
5	ARTROPLASTIA DE CADERA	0
6	ARTROPLASTIA DE RODILLA	0
7	ARTROSCOPIA	0
8	CAMBIO DE VAC	0
9	CIRUGIA AMBULATORIA	0
10	CIRUGIA RECONSTRUCTIVA	1
11	COLGAJO DE DEDO/MANO	0
12	COLOCACION DE YESO PELVIPEDIO	0
13	DESVINCULACION DE CROSS FINGER	0
14	FIJACION EXTERNA	1
15	LIMPIEZA QUIRURGICA	0
16	RAFI DE ANTEBRAZO	1
17	RAFI DE CABEZA RADIAL	1
18	RAFI DE CADERA	1
19	RAFI DE CALCANEOS	1
20	RAFI DE CLAVICULA/ACROMIOCLAVICULAR	1
21	RAFI DE CUBITO PROXIMAL	1
22	RAFI DE ESCAPULA	1
23	RAFI DE FALANGE/MTC/MTT	1
24	RAFI DE FEMUR DIAFISIARIO	1
25	RAFI DE FEMUR DISTAL	1
26	RAFI DE HUMERO DISTAL	1
27	RAFI DE HUMERO DISTAL PEDIATRICO	1
28	RAFI DE HUMERO PROXIMAL/DIAFISIARIO	1
29	RAFI DE PELVIS	1
30	RAFI DE RADIO DISTAL	1
31	RAFI DE ROTULA	1
32	RAFI DE TIBIA DIAFISIARIA	1
33	RAFI DE TIBIA DISTAL	1
34	RAFI DE TIBIA PROXIMAL	1
35	RAFI DE TOBILLO	1
36	RAFI MULTIPLE	1
37	RAFI OTROS	1
38	RETIRO DE IMPLANTE	0
39	RETIRO DE MATERIAL	0
40	TENORRAFIA DE AQUILES	0
41	TENORRAFIA/NEURORRAFIA DE MIEMBRO SUPERIOR	0