



**FACULTAD DE POSTGRADO  
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

**“MODELADO PREDICTIVO DE LA DEMANDA ATS PARA LA  
OPTIMIZACIÓN SECTORIAL EN CENAMER BASADO EN  
DATOS 2024-2025”**

**SUSTENTADO POR:  
JUAN CARLOS BADOS TORRES  
MISAEAL PORFIRIO ÁLVAREZ BONILLA**

**PREVIA INVESTIDURA AL TÍTULO DE  
MÁSTER EN  
ANALÍTICA DE NEGOCIOS**

**TEGUCIGALPA, FRANCISCO MORAZÁN, HONDURAS, C.A.  
MAYO, 2026**



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA  
UNITEC**

**FACULTAD DE POSTGRADO**

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**RECTORA**

**ROSALPINA RODRÍGUEZ**

**VICERRECTOR ACADÉMICO NACIONAL**

**JAVIER ABRAHAM SALGADO LEZAMA**

**SECRETARIO GENERAL ROGER MARTÍNEZ MIRALDA**

**DECANA FACULTAD DE POSTGRADO**

**ANA DEL CARMEN RETTALLY VARGAS**

**“MODELADO PREDICTIVO DE LA DEMANDA ATS PARA LA  
OPTIMIZACIÓN SECTORIAL EN CENAMER BASADO EN  
DATOS 2024-2025”**

**TRABAJO PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE LOS  
REQUISITOS EXIGIDOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MÁSTER EN**

**ANALÍTICA DE NEGOCIOS**

**ASESOR**

**JESÚS RICARDO RODRÍGUEZ RIVERA**

**MIEMBROS DE LA TERNA:**

**DAVID ANTONIO MEJÍA DÍAZ**

**KEVIN EDUARDO FÚNEZ FÚNEZ**

**ANTHONY STEVE BARAHONA ESPINOZA**

# **DERECHOS DE AUTOR**

**© Copyright 2026**

**Juan Carlos Bados Torres**

**Misael Porfirio Álvarez Bonilla**

**Todos los derechos son reservados.**



## **FACULTAD DE POSTGRADO**

# **“MODELADO PREDICTIVO DE LA DEMANDA ATS PARA LA OPTIMIZACIÓN SECTORIAL EN CENAMER BASADO EN DATOS 2024-2025”**

**JUAN CARLOS BADOS TORRES  
MISAEAL PORFIRIO ÁLVAREZ BONILLA**

### **Resumen**

La investigación analizó la demanda de servicio de tráfico aéreo (ATS) respecto al uso de los sectores operacionales utilizados por el Centro de Control de Área de Centroamérica (CENAMER); integrando el análisis de datos y modelos predictivos, el estudio plantea optimizar el uso de recursos. Con una propuesta de mejora mediante la reducción del 10% del uso de la capacidad máxima de los sectores aéreos, se estipula la disminución de la carga laboral y la optimización del uso de recursos para prevenir la subutilización o sobrecarga de estos. Utilizando data correspondiente a los periodos 2024 y 2025, y basado en una metodología cuantitativa (no experimental y longitudinal), el estudio analizó los registros operacionales mediante técnicas estadísticas y descriptivas con el propósito de generar modelos predictivos. El uso de series temporales permite la identificación y consideración de los patrones de sectores de vuelo, por lo que presenta una perspectiva especial para la recolección de datos y demás consideraciones. Es necesario integrar el modelado para la comparación de resultados; mediante el uso del modelo SARIMA, el cual presenta el mejor rendimiento, se facilita la división de variables con alta correlación y diferencias estadísticamente significativas correspondientes a distribuciones no paramétricas de los datos. Esto permite generar un modelo aplicable para la predicción de operaciones con la finalidad de estructurar mejoras para la reducción de costos y la optimización de recursos.

Palabras clave: Aeronáutica, Analítica de Datos, CENAMER, Series de Tiempo, Tráfico Aéreo



## GRADUATE SCHOOL

# **“PREDICTIVE MODELING OF AIR TRAFFIC DEMAND FOR OPTIMIZATION OF SECTORS AT CENAMER WITH DATA FROM 2024-2025”**

**JUAN CARLOS BADOS TORRES  
MISAEAL PORFIRIO ÁLVAREZ BONILLA**

### **Abstract**

The research analyzed the demand for Air Traffic Services (ATS) in relation to the use of operational sectors managed by the Central American Area Control Center (CENAMER). By integrating data analysis and predictive modeling, the research aims to optimize the use of resources. Through a proposed improvement plan consisting of a 10% reduction in the use of the maximum capacity of airspace sectors, the study seeks to decrease workload while optimizing resource utilization to prevent both the underutilization and exploitation of resources. Using data corresponding to 2024 and 2025 and based on a quantitative methodology (non-experimental and longitudinal), the study intends to use operational records for statistical and descriptive analysis to develop predictive models. The integration of time series models enables the identification of patterns related to flight sectors, offering a robust framework for data collection and analysis. It is essential for comparing results to integrate models, such as the SARIMA model, which demonstrated the best performance among the evaluated approaches. This model facilitates the differentiation of variables with high correlation and statistically significant differences, particularly in the context of non-parametric data distributions. Consequently, the study establishes a predictive framework applicable to forecasting operations, supporting decision-making processes and the optimization of resource usage.

Key Words: Aviation, Air Traffic, CENAMER, Data Analysis, Time-series

## DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mi abuelo, un ejemplo de fuerza, superación y sabiduría; en vida un mentor y en muerte una inspiración sin igual, mi motivo de seguir y alcanzar esta meta. Tus lecciones y tu recuerdo estarán en lo más profundo de mi corazón por el resto de mi vida. Dedico este estudio a mi abuela, quien me motivó y apoyó cada momento de este camino; tu cariño y orgullo me motivan a siempre buscar la excelencia, tu fuerza me recuerda lo valiosa que es la familia y el amor que debemos tener hacia nuestros seres queridos. Finalmente dedico esta investigación a mi madre, mi mejor amiga y mi motivo de ser; agradezco cada palabra, regaño y pequeño gesto que me empuja a seguir adelante y ser quien soy el día de hoy; tu guía ha sido indispensable para cada uno de mis logros, tus palabras me dan fuerza aun en los momentos más difíciles. Celebro este éxito por tu sacrificio, amor y tu inquebrantable espíritu.

- Juan Carlos Bados Torres

En esta importante etapa de formación, dedico este logro a Dios, por su infinita gracia y misericordia, que me acompañan siempre. Como dice Tito 2:11, Dios ha manifestado su gracia y bondad, al ofrecer la salvación a toda la humanidad.

Asimismo, dedico este logro a mis padres, Misael Álvarez y Amanda Bonilla, quienes son ejemplo de esfuerzo y superación, siendo un baluarte para la familia. De igual manera, a mis hermanas, Heydy y Amanda Álvarez, quienes son parte fundamental en el desarrollo de mi vida.

- Misael Porfirio Álvarez Bonilla

## AGRADECIMIENTO

Quisiera iniciar expresando mi gratitud hacia la Universidad Tecnológica Centroamericana y cada uno de los docentes que impartieron sus conocimientos y experiencia conmigo; este periodo de aprendizaje tendrá impacto en mi futuro y esta investigación marca el fin de un capítulo del cual me siento sumamente orgulloso. Agradezco la oportunidad que nos brindó COCESNA para realizar esta investigación y de esta manera aportar algo que será útil en el futuro. Agradezco a mis compañeros de maestría Misael, Mario y Eduardo; iniciamos esta experiencia juntos y con dedicación y esfuerzo logramos terminarla. Agradezco a mi padre, tíos, primos y demás familiares, quienes confiaron en mí y apoyaron cada paso en este camino; sus ánimos me ayudaron a mantenerme motivado. Agradezco a mi mejor amigo Daniel, quien más que un amigo es un hermano; agradezco el apoyo, los chistes, consejos y la disposición para acompañar. Agradezco a mi querida mascota Linda, una diva felina que ha traído alegría a nuestro hogar. Agradezco a mis amigos: Ana Sofía, María Belén, Roosevelt, Vanessa, Matthew, Brett, Erika, Alex, Elijah, Amara, José, McLane, Nelson y todas las demás personas con las que he compartido. Las lecciones que aprendí de ellos siempre las recordaré y las risas que compartimos siempre las atesoraré. Finalmente me agradezco a mí mismo por perseverar y esforzarme; fue exhaustivo, pero nadie puede negar el esfuerzo para lograrlo.

- Juan Carlos Bados Torres

Agradezco a COCESNA por brindar la oportunidad de realizar esta investigación, permitiéndome culminar una etapa importante como lo es la maestría.

De igual manera, agradezco a Roger Pérez, Lorena Reyes, Héctor Lee, Henry Reyes y René Martínez, quienes me brindaron su orientación, apoyo y autorización para llevar a cabo la investigación.

A mis compañeros de maestría, Juan, Mario y Eduardo: he aprendido mucho de ustedes y son grandes profesionales. Ha sido un honor compartir este camino de aprendizaje y confío en que nuestros caminos volverán a coincidir en el futuro.

- Misael Porfirio Álvarez Bonilla

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4.1 PREGUNTA GENERAL .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4.2 PREGUNTAS ESPECÍFICAS .....</b>	<b>8</b>
<b>1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>8</b>
<b>1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>9</b>
<b>1.6 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 MACROENTORNO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1 COLOMBIA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2 FILIPINAS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3 NIGERIA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 MICROENTORNO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 COSTA RICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2 EL SALVADOR .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.3 GUATEMALA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.4 HONDURAS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 CONCEPTUALIZACIÓN.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 TEORÍAS DE SUSTENTO .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.1 BASES TEÓRICAS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6 ANTECEDENTES DE METODOLOGÍAS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.7 METODOLOGÍAS, ENFOQUES Y DISEÑOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.8 ANÁLISIS CRÍTICO.....</b>	<b>13</b>

2.9 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS.....	14
2.10 MARCO LEGAL.....	15
2.10.1 LEGISLACIONES INTERNACIONALES.....	15
2.10.2 LEGISLACIONES NACIONALES .....	16
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 ENFOQUE .....</b>	<b>17</b>
3.1.1 MATRIZ METODOLÓGICA .....	17
3.1.2 ESQUEMA DE VARIABLES DE ESTUDIO.....	20
3.1.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	20
3.1.4 HIPÓTESIS.....	22
3.2 ALCANCE .....	22
3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
3.3.1 POBLACIÓN .....	23
3.3.2 MUESTRA .....	24
3.3.3 TÉCNICA.....	24
3.3.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	25
3.4 TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS APLICADOS .....	25
3.5 FUENTES DE INFORMACIÓN .....	27
3.5.1 FUENTES DE INFORMACIÓN PRIMARIA .....	27
3.5.2 FUENTES DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.....	27
3.6 PLAN DE ANÁLISIS DE DATOS .....	27
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS.....</b>	<b>30</b>
4.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CONJUNTO DE DATOS (EDA) .....	30
4.1.2 LIMPIEZA Y PREPARACIÓN DE LOS DATOS .....	34
4.1.3 VISUALIZACIÓN DE DATOS .....	38
4.1.4 CONCLUSIONES DEL EDA.....	49
4.2 INFORME DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	53
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN.....	53
4.2.2 PARTICIPANTES O FUENTES DE INFORMACIÓN .....	54
4.2.3 INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	54
4.2.4 DIFICULTADES ENCONTRADAS .....	56

4.2.5 CONSIDERACIONES ÉTICAS .....	57
4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS APLICADAS .....	58
4.3.1 RESULTADOS CUANTITATIVOS .....	58
4.3.2 ANÁLISIS CUALITATIVO.....	70
4.4 ANÁLISIS INFERENCIAL Y MODELOS APLICADOS .....	73
4.4.1 ANÁLISIS INFERENCIAL .....	73
4.4.2 MODELOS APLICADOS .....	76
4.4.3 DISCUSIÓN DE HALLAZGOS .....	79
4.4.4 LIMITACIONES.....	82
4.5 SÍNTESIS DE HALLAZGOS .....	83
4.5.1 PRINCIPALES HALLAZGOS.....	83
4.5.2 IMPLICACIONES .....	85
4.5.3 TRANSICIÓN AL CAPÍTULO V .....	86
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	87
5.1 CONCLUSIONES .....	87
5.2 RECOMENDACIONES .....	88
CAPÍTULO VI. APLICABILIDAD.....	89
6.1 NOMBRE DE LA PROPUESTA.....	89
6.2 JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA .....	89
6.3 ALCANCE DE LA PROPUESTA.....	91
6.4 DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO .....	92
6.4.1 DESCRIPCIÓN .....	92
6.4.2 DESARROLLO .....	94
6.5 MEDIDAS DE CONTROL .....	97
6.6 CRONOGRAMA DE IMPLEMENTACIÓN Y PRESUPUESTO.....	100
6.7 PRESUPUESTO E IMPACTO DE PRESUPUESTO .....	103
6.8 CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA PROPUESTA .....	106
REFERENCIAS .....	113
ANEXOS .....	120
ANEXO 1: CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE DATOS .....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Ejemplo económico comparativo basado en supuesto 2
- Tabla 2. Ejemplificación de costos basado en supuestos 4
- Tabla 3. Análisis de fuerzas de Porter de cuatro países centroamericanos 21
- Tabla 4. Análisis comparativo de metodologías en previas investigaciones 12
- Tabla 5. Herramientas de la investigación 14
- Tabla 6. Legislaciones internacionales 15
- Tabla 7: Legislaciones Nacionales 16
- Tabla 8: Matriz de congruencia 18
- Tabla 9: Continuación de matriz de congruencia 19
- Tabla 10: Operacionalización de variables 21
- Tabla 11: Tabla de hipótesis de la investigación 22
- Tabla 12: Tabla de Inclusión y Exclusión 25
- Tabla 13: Diccionario de datos 26
- Tabla 14: Continuación de Diccionario de datos 26
- Tabla 15. Descriptivo de tipo de variable a utilizar post depuración 32
- Tabla 16. Estadísticos descriptivos de variables numéricas 32
- Tabla 17. Muestra representativa de matriz del estudio 36
- Tabla 18. Descriptivo de valores faltantes 36
- Tabla 19. Desglose de operaciones por periodo 64
- Tabla 20. Pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis 65
- Tabla 21. Pruebas de correlación 66
- Tabla 22. Cuadro comparativo de modelos probados 73
- Tabla 23. P-value para prueba Dickey-Fuller 74
- Tabla 24. Cuadro de parámetros por modelo 76
- Tabla 25. Hipotético para ejemplificación 88
- Tabla 26. Indicador de Precisión del Modelo 98
- Tabla 27. Indicador de Nivel de Adopción del Modelo Predictivo 98
- Tabla 28. Indicador de Tiempo de Respuesta para la Toma de Decisiones 99

Tabla 29. Indicador de Plan de Capacitación	99
Tabla 30. Indicador de Nivel de Progreso en la Planificación Operativa	100
Tabla 31. Cronograma de implementación	101
Tabla 32. Inversión de implementación en Lempiras	103
Tabla 33. Ejemplificación de efecto de propuesta	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Análisis de consecuencia de la falta de optimización sectorial	12
Ilustración 2: Diagrama de relación de variables	20
Ilustración 3: Diagrama de Gantt para el Plan de Análisis de los Datos	28
Ilustración 4. Proceso de depuración para muestra censal temporal	31
Ilustración 5. API - Air Traffic Flow Management	34
Ilustración 6. Sesgo y cola de minutos	38
Ilustración 7. Dispersión de minutos	39
Ilustración 8. Caja y bigotes de minutos	39
Ilustración 9. Sesgo y cola de millas	40
Ilustración 10. Dispersión de millas	40
Ilustración 11. Caja y bigotes de millas	41
Ilustración 12. Sesgo y cola de nivel de vuelo	42
Ilustración 13. Dispersión de nivel de vuelo	42
Ilustración 14. Caja y bigotes de nivel de vuelo	43
Ilustración 15. Mapa de calor de correlaciones entre variables numéricas	44
Ilustración 16. Análisis bivariado numérico	45
Ilustración 17. Multivariado de minutos y millas por sector	47
Ilustración 18. Multivariado de nivel de vuelo y minutos por sector	48
Ilustración 19. Conteo de registros y operaciones por sector	49
Ilustración 20. Distribución de nivel de vuelo por registro y por operación	51
Ilustración 21. Demanda de la serie temporal	52
Ilustración 22. Despliegue de aplicativo ATFM - Air Traffic Flow Management	- 54

Ilustración 23. Promedio de millas	60
Ilustración 24. Promedio de minutos	60
Ilustración 25. Sumatoria de millas	61
Ilustración 26. Sumatoria de minutos	62
Ilustración 27. Promedio de millas voladas por tipo de aeronave	63
Ilustración 28. Promedio de nivel de vuelo por tipo de aeronave	63
Ilustración 29. Modelo SARIMA	67
Ilustración 30. Modelo ARIMA	68
Ilustración 31. Modelo Lasso Regression	69
Ilustración 32. Modelo Robust Regression	70
Ilustración 33. Predicción de modelo ARIMA y SARIMA	75
Ilustración 34. Mejor dispersión - SARIMA	77
Ilustración 35. Menor grado leptocúrtico - Lasso	78
Ilustración 36. Mejor ajuste Q-Q - ARIMA	78
Ilustración 37. Registros por hora	80
Ilustración 38. Registros por día de semana	81
Ilustración 39. Tendencias anuales	82
Ilustración 40. 5 porqués para la implementación de la propuesta	90
Ilustración 41. Infraestructura técnica	93

# CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El rubro aeronáutico es uno de los más importantes dentro del mercado internacional; representa el 1% del PIB a nivel global, y la aviación es uno de los medios de transporte y comercio más importantes tanto desde una perspectiva social como económica. La Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA, 2024) describe en el comunicado No. 58 que el rubro de tránsito aéreo proyectó por primera vez ganancias superiores a un billón de dólares; sin embargo, los costos de estas aerolíneas equivalen a 940 mil millones, lo que equivale a un margen de 3.6% en ganancias o siete dólares por pasajero (p.2).

Considerando la magnitud de este mercado, es necesario mencionar que las operaciones de este crecen constantemente, a pesar de un margen de ganancia mínimo; regionalmente se ha registrado un crecimiento considerable respecto a las operaciones manejadas. De acuerdo a la información de las tablas de operaciones recolectada por Centro de Control de Área de Centroamérica (CENAMER, 2026), entre el periodo 2024 y 2025 se registró un crecimiento consecutivo de 2.46% y 30.98% respectivamente.

CENAMER forma parte de los departamentos operativos de la Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea (COCESNA); será el departamento operativo que se utilizará en este estudio; su relevancia es marcada por su función como el regulador de tránsito aéreo de la región, por lo cual el estudio pretende analizar las variables que afectan la eficiencia y distribución. Se tomará como punto central la distribución de sectores establecidos por los lineamientos de la organización y el efecto de estos en el ámbito económico y operacional.

La institución está formada por los estados miembros de Belice, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica. Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea (COCESNA, 2025) detalla que tiene como misión “proveer servicios aeronáuticos con los más altos estándares de seguridad, eficiencia y calidad”, contribuyendo con servicios mediante operaciones de control para vuelos de 20,000 pies en adelante.

Considerando la magnitud de las operaciones de CENAMER, se requiere considerable planificación de sus agentes. El estudio considera las variables como la capacidad de respuesta, recursos (tanto físicos como humanos) necesarios para operar y demás egresos como elementos

que tienen efecto en el análisis, por lo que la subutilización de recursos es una severa problemática. Para visualizarlo de mejor manera, se utiliza la siguiente tabla:

**Tabla 1. Ejemplo económico comparativo basado en supuesto**

<b>Suposiciones:</b>			
Se estipula la atención de 300 vuelos por día, se contará un mes como 30 días, los sectores deberán operar debajo del límite y por cada 5 controladores, se requiere un supervisor.			
<b>Datos de Ejemplo:</b>			
L 1,000.00	Costo por hora de un controlador aéreo		
L 1,500.00	Costo por hora de supervisor de controlador aéreo		
8.00	Horas por un día (jornada laboral)		
L 250.00	Costo por servicios (electricidad, agua y demás gastos operativos) por individuo		
L 60,000.00	Costos fijos mensuales		
<b>Cálculo de costos:</b>			
		<b>EJ. 1</b>	<b>EJ. 2</b>
Controladores por Jornada		14.00	10.00
Supervisores por Jornada		3.00	2.00
Sectores activos durante la jornada		7	5
Planilla por hora	(costo por hora) x (individuos) =	L18,500.00	L13,000.00
Planilla diaria	(Planilla por hora) x (jornada) =	L148,000.00	L104,000.00
Costo promedio por vuelo	(Planilla diaria) / (vuelos) =	L493.33	L346.67
Planilla Mensual	(Planilla diaria) x 30 =	L4,440,000.00	L3,120,000.00
Costos operacionales diarios	(individuos) x (Operativos) =	L 4,250.00	L 2,500.00
Costos operacionales mensuales	(Operacionales diarios) x 30 =	L127,500.00	L75,000.00
Costo Mensual	Suma (costos mensuales) =	L4,627,500.00	L3,255,000.00
Promedio por avión	(costo mensual) / (300*30) =	L514.17	L361.67
Diferencia total mensual =	EJ. 1 utiliza al mes L1,392,500.00 más que el EJ. 2		
Diferencia promedio por operación=	EJ. 1 cuesta en promedio L152.50 más que el EJ. 2		

Fuente: Elaboración propia

En el comparativo previo se observa cómo la subutilización de recursos (incurrir en más sectores de lo necesario) tiene costos adicionales, lo que representa una pérdida de bienestar para la institución y el rubro de la aeronáutica. Para suplir la demanda existente, la planificación de operaciones se debe realizar ajustándose a las proyecciones utilizadas; sin embargo, es importante tener en consideración que los modelos existentes en diferentes situaciones no se ajustan a la realidad, por lo que es necesario integrar estas consideraciones para una distribución óptima.

Con el fin de analizar la problemática existente, se requiere de una profunda comprensión del rubro de la aviación y el control aéreo; regulado por acuerdos internacionales y parámetros de servicio específicos a este sector, el Control de Tránsito Aéreo (CTA) requiere de un análisis que

permita optimizar el funcionamiento de este y de esta manera aumentar los márgenes de ganancia o utilizar los recursos de manera apropiada. Para poder realizar el estudio, se plantea un análisis de la data histórica obtenida mediante la Coordinación Air Traffic Flow Management (ATFM), la cual se pretende analizar para generar modelos predictivos y representaciones gráficas con la finalidad de compartir conocimiento sobre las opciones existentes para la optimización.

La investigación se estructura de la siguiente manera:

- El capítulo 1 establece la base de la investigación, delimitando las preguntas clave e ideas centrales para exponer la temática a estudiar. Brinda contexto sobre motivos, problemática y permite una mejor comprensión del contexto de la investigación. La finalidad del capítulo es establecer los cimientos para el análisis de las variables.
- El capítulo 2 de la investigación plantea las bases conceptuales, estructurando el marco teórico pertinente para el estudio. Hace referencia a estudios previos que sustenten la investigación, contextualiza la temática en ámbitos micro y macro y demás conceptos que se consideran relevantes para una mejor comprensión de la temática. El marco teórico investigativo tiene como finalidad brindar un entendimiento profundo del rubro en el que se labora, al igual que similitudes o regulaciones pertinentes para la investigación.
- El capítulo 3 de la investigación contiene el marco metodológico utilizado en la investigación; esta sección incluye los parámetros utilizados para plantear el estudio desde una perspectiva técnica y toma en consideración los elementos poblacionales, equipo a utilizar, pasos a seguir y demás detalles del proceso investigativo que tengan pertinencia.
- El capítulo 4 contiene los resultados prácticos de la investigación; integrando los datos a las herramientas propuestas, este tiene como objetivo examinar y detallar los resultados, patrones y demás observaciones que se pueden adquirir del análisis de los datos mediante el análisis exploratorio e inferencial.
- El capítulo 5 refleja las conclusiones y recomendaciones del estudio de acuerdo con los objetivos específicos trazados y que responden a las preguntas de investigación, evidenciando los resultados y hallazgos encontrados para desarrollar un plan integral para ser aplicado en la empresa.

- El capítulo 6 propone la ejecución de un plan integrador de modelos predictivos para el beneficio institucional por medio del uso de datos para la toma de decisiones mediante entregables, indicadores clave y un esquema de infraestructura técnica.

## 1.2 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El tránsito aéreo, debido a cambios de variaciones no planificadas de las operaciones, presenta una problemática respecto a sus gestiones; la demanda existente por las instituciones, considerando estas fluctuaciones, sufre de retrasos, cambios en los planes de vuelo, cancelaciones y demás. International Air Transport Association (IATA, 2026) reporta que, según los resultados del periodo 2025, el Proveedor de Servicios de Navegación Aérea Europea (ANSP) generó costos de 16.1 billones de euros relacionados a retrasos en la gestión del tráfico aéreo; similar a esto, las demás regiones se ven afectadas por una problemática compartida, la cual representa costos por cambios o pérdidas relacionadas a subutilización de recursos en los centros de control regional.

Las variaciones dentro de las operaciones afectan la distribución de los sectores y el uso de recursos; considerando las fluctuaciones de la demanda existente, los centros de control pueden no disponer de la capacidad de personal necesario para suplir la demanda, por otro lado, una distribución ineficiente puede generar una subutilización considerable respecto al uso de recursos y distribución del espacio aéreo, lo que representa una problemática no solo de planificación, sino en el aspecto monetario o reputacional. Para ejemplificar utilizaremos las siguientes suposiciones:

**Tabla 2. Ejemplificación de costos basado en supuestos**

Concepto	Monto por hora	Diario
Día bajo (4 controladores)	L4,000.00	L32,000.00
Día promedio (6 controladores)	L6,000.00	L48,000.00
Día medio (8 controladores)	L8,000.00	L64,000.00
Día alto (12 controladores)	L12,000.00	L96,000.00

Concepto	Cantidad	Ajustado	Promedio
Día 1	200	L32,000.00	L48,000.00
Día 2	150	L32,000.00	L48,000.00
Día 3	350	L64,000.00	L64,000.00
Día 4	450	L96,000.00	L96,000.00
Día 5	100	L32,000.00	L48,000.00

Fuente: Elaboración propia

Considerando las alternativas, una distribución ajustada y una distribución promedio, se observa una variación considerable. Suponiendo que por pareja de controladores se realizan cien operaciones en una jornada, se observa como la distribución promedio, al no considerar la

necesidad de personal o debido a proyecciones deficientes, en un periodo de cinco días incurrió en un gasto adicional de L36,000.

Asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA, 2026) indicó que la demanda de operaciones que se ha observado en los últimos años en la región de América Latina y el Caribe respecto al tráfico aéreo tuvo un incremento interanual promedio del 2.3% en el mes de noviembre de 2025; quiere decir que los modelos predictivos serán de suma importancia para la planificación operativa. Si bien la planificación de estos viajes se realiza con anticipación, las variaciones por temporadas de alta demanda, cancelaciones por factores exógenos o tendencias de viaje afectarán en considerable manera la capacidad de respuesta del personal de control, por lo que es necesario tener la mayor cantidad de información posible con la finalidad de tener alternativas.

Es vital pronosticar de manera apropiada los patrones de vuelo según las tendencias cíclicas o por influencias externas, mediante esto es posible integrar ajustes que permitirán optimizar las operaciones; el crecimiento de este rubro presenta una oportunidad de mejora considerable y al mismo tiempo puede crear conflictos de no poder suplir la demanda de los servicios, por lo que la utilización correcta de recursos es necesaria para poder operar de manera eficiente.

El personal de control, como todo humano, puede ser abrumado por el volumen de operaciones asignadas; este hecho puede empeorar en caso de que una segmentación deficiente sea aplicada; es de alta prioridad velar por los CTA, ya que estos deben operar acertadamente y evitar posibles riesgos operacionales relacionados con fallas de las facultades mentales. Alonso & Martin (2024) indican que la fatiga afecta de manera negativa la concentración, toma de decisiones y capacidad de respuesta (p.35); por lo que es significativo el control y regulación de los controladores para que estos operen en su mejor estado y consecuente a este, no se incurran en riesgos físicos, reputacionales o monetarios.

En un estudio relacionado a siniestros marítimos, Alonso & Martin (2024) afirman que estadísticamente el 80% de estos se dan a raíz del estrés (p.15). Considerando las diferencias entre los rubros, se puede extraer una verdad compartida en ambas situaciones, la cual es la correlación existente entre el estado mental del individuo y el rendimiento de este; una sectorización ineficiente puede presentarse como un riesgo y un costo, por lo que es necesario ajustar de manera apropiada los parámetros y políticas utilizadas para poder determinar los procedimientos a manera de reducir

carga y controlar los egresos para una gestión sin gastos innecesarios.

El control aéreo y los demás aspectos pertinentes a este siempre tendrán presente un grado de estrés debido al carácter del rubro; sin embargo, es necesario entender que laboralmente una subutilización o sobrecarga del personal tendrá efectos considerables en el rendimiento institucional. Jaimes Zamora (2017) indica que, en un estudio realizado en 1958, de aproximadamente 295 Controladores de Tránsito Aéreo (CTA), el 53% se atribuye a la cantidad de aeronaves bajo su control como un generador de estrés (p.44). La necesidad de una distribución optimizada no solo afecta el aspecto económico de la institución, sino que el balance entre empleados puede ser un factor determinante en las interacciones internas o el comportamiento de los empleados, el cual eventualmente afectará el desempeño de estos.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2020b) establece en el manual para la gestión del tránsito aéreo que la falta de descanso apropiado por periodos extensos contribuye a un aumento del 40% en los errores de procedimientos y la toma de decisiones (p.12). Esta observación por parte de la OACI, similar al estrés previamente mencionado o las alteraciones del estado mental, indica la necesidad de descanso apropiado, el cual se verá directamente en la carga y la distribución.

Este tipo de problemas está ligado a errores en la creación de modelos o falta de ajustes necesarios para poder afinar las predicciones utilizadas para el planeamiento. Sanaei et al., (2021) relata que en base a un modelo neuronal entrenado entre 2016 y 2017, se puede predecir los datos para el periodo 2018 con error de media del 22% y 14% para el retraso del tráfico (p.1); Considerando que las predicciones de tránsito aéreo presentan variaciones, se consideraría prudente implementar validación de proyecciones y en caso de requerirlo, ajustes al modelo utilizado para disminuir la posibilidad de que estos factores afecten el rendimiento de la institución.

El efecto del desbalance en la capacidad de cada segmento no solo afecta el ámbito operacional, sino que presenta un efecto organizacional e inclusive personal de considerable magnitud debido a una administración de recursos deficiente; el causal de esta problemática puede detallarse como la insuficiencia o excedente en cuanto al uso de recursos, por lo que la investigación proponer realizar análisis con el fin de impartir conocimiento sobre los hallazgos y sugerir consideraciones respecto a los recursos y la distribución de sectores.

## **1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.3.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA**

En acorde a los lineamientos y buenas prácticas de los proveedores de servicios de tránsito aéreo, se deberá establecer parámetros para la sectorización del espacio aéreo con la finalidad de distribuir la carga asignable al personal; contrario a esto, debido a circunstancias no fortuitas, la distribución de los sectores puede no ser óptima, considerando elementos como carga, situaciones exógenas o demanda del servicio. Los lineamientos de operación de CENAMER indican que la configuración con menor capacidad tiene un nivel de alerta de 21 operaciones en sector único y la configuración con el máximo nivel de alerta corresponde a 77 operaciones en una configuración dinámica.

Ejemplificando la posible desigualdad, en una configuración dinámica a pesar de tener un máximo de 77 operaciones previo a la alerta, la distribución de la carga dentro de los sectores puede ser desproporcionada; suponiendo el uso de 6 sectores, puede ocurrir que los controladores de un sector operen al 100% de la capacidad, otro sector a 70% y el resto por debajo del 50%. La distribución, si bien funcional, no es óptima, por lo que, al ajustar los sectores a las necesidades, se tendría un mejor manejo de las operaciones, el control de los CTA y la disminución de costos previamente utilizados por modelos ineficientes o recursos subutilizados.

Las organizaciones (tanto demandantes de servicios como proveedoras) se ven afectadas por una capacidad de respuesta deficiente o excedente, lo que causa pérdidas de bienestar, daños en la moral del personal y la falta de cumplimiento con las expectativas de los reguladores. Establecer parámetros y flexibilizar los procesos según las necesidades se vuelve vital debido a la incertidumbre de las variaciones dentro del mercado, especialmente al considerar las tendencias geopolíticas actuales, las cuales presentan cambios en base a la tensión entre naciones.

Se plantea un análisis numérico que brinde información útil para la toma de decisiones respecto a las posibles mejoras aplicables para las operaciones de CENAMER, considerando los factores monetarios, regulatorios y de personal.

### **1.3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Mediante la exploración de los datos históricos, se propone la creación de modelos matemáticos que ejemplifiquen el flujo operacional de CENAMER mediante el análisis del periodo

2024 al 2025, realizando posteriormente proyecciones para el periodo 2026; en base a la interpretación de resultados se espera formular conclusiones que permitan estructurar un documento académico, brindando mejor entendimiento de los datos y planteando una diferente metodología de trabajo para mejoras de las prácticas actuales. Se deberán considerar las disposiciones legales y operacionales que tengan impacto en el resultado del estudio, proporcionando conocimiento respecto a los cambios que el área pueda implementar en la planificación operacional.

## **1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 PREGUNTA GENERAL**

¿En el (P) personal ATS, la (I) reducción en un 10% en la utilización de los sectores basada en el análisis de la data histórica, (C) comparada con la distribución actual, (O) genera una disminución significativa en la carga laboral durante el periodo 2026?

### **1.4.2 PREGUNTAS ESPECÍFICAS**

- ¿(I) La modificación de parámetros de la capacidad sectorial basada en análisis estadísticos, (P) aplicada a los controladores de tránsito aéreo, en (C) comparación al parámetro actual, (O) mejora el rendimiento operacional mediante cambios en la distribución de carga laboral?
- ¿La (I) aplicación de modelos de series de tiempo sobre (P) los datos del periodo 2024 al 2025, (C) comparativa a un análisis descriptivo tradicional, permite (O) identificar patrones de demanda no detectables por métodos convencionales?
- ¿(I) La adopción de políticas operacionales basadas en la optimización y predicción estadística en (P) la planificación para el periodo 2026, (C) comparado con el modelo actual de planificación, (O) mejora la delimitación de parámetros y toma de decisiones?

## **1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025, utilizando recursos (A) disponibles con la información existente, con la finalidad de (R) disminuir

la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementado (T) mediante un piloto en el cuarto trimestre de 2026.

### 1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar (S) los patrones de utilización de sectores mediante métricas estadísticas, (M) detallando el comportamiento de los datos del 2024 al 2025, utilizando información histórica (A) accesible mediante registros operacionales, para la (R) optimización de parámetros de sectorización previa a su implementación (T) en el cuarto trimestre del 2026.
- Examinar (S) las proyecciones para el periodo 2026 utilizando modelos de series de tiempo (M) evaluando R-cuadrado ajustado y error del pronóstico, con bases de datos (A) aplicables con herramientas analíticas, (R) validando el modelo predictivo para la planificación (T) previa a un piloto para el periodo 2026.
- Evaluar (S) el impacto del cambio en la sectorización mediante simulaciones y análisis de los KPIs, (M) comparando resultados con el modelo actual, utilizando supuestos de los registros (A) mediante el modelado de datos, para (R) determinar las políticas de la gestión del espacio aéreo para (T) su uso en el cuarto trimestre del 2026.

## 1.6 JUSTIFICACIÓN

El control del tránsito aéreo, debido al carácter de sus operaciones, requiere de detallada planificación para la reducción del margen de error o variaciones ocasionadas por cambios repentinos; las coordinaciones involucradas requieren de un proceso confiable, expedito y flexible para ajustarse a las necesidades existentes. La sectorización del espacio aéreo permite controlar de mejor manera la afluencia de tránsito aéreo, esto con la finalidad de optimizar los servicios y tener alternativas en caso de requerirlas; debido a la variabilidad en las operaciones, la problemática existente se relaciona con los cambios repentinos en la demanda.

El estudio plantea oportunidades de mejora mediante el análisis de datos históricos con la finalidad de brindar un modelo de proyección y sugerir políticas de optimización basadas en los resultados para la mejora del departamento. Esta investigación tiene un enfoque en el ámbito numérico, por lo que se harán pruebas estadísticas, comparativas y modelado de datos para la interpretación e identificación de posibles mejoras.

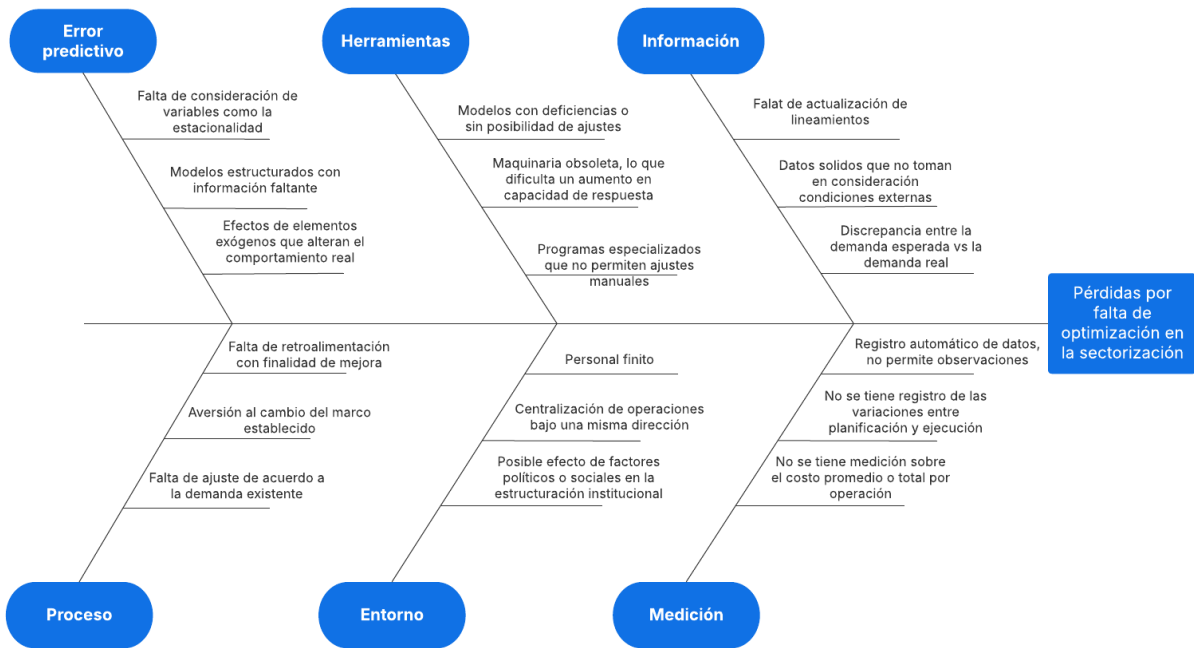
Mediante el estudio de las tendencias, los controladores de tráfico aéreo pueden adquirir

información fiable respecto a la planificación; considerando la importancia de estas, es vital que para la toma de decisiones se utilice data relevante y con desviaciones mínimas. Se plantea que mediante la predicción de resultados, la capacidad de los sectores y la carga del tránsito pueden ser calculadas como referencia futura para ayudar a la gestión del tráfico aéreo (Phyoe et al., 2016).

Las diferentes consideraciones sobre la predicción de la trayectoria de vuelos, variaciones de las operaciones y otros factores son de suma importancia para una proyección certera; en casos donde la data se presenta con variaciones considerables, aun utilizando un modelo fiable, los cálculos pueden fluctuar significativamente. La necesidad de precisión al momento de integrar los datos se da con el fin de eliminar incertidumbre. Vos et al. (2024) explican la importancia de tener conocimiento de la demanda del sector para balancear las operaciones de manera que estas sean seguras y eficientes; esto permite que, mediante el conocimiento de la demanda y las capacidades de respuesta, sea posible adaptar la disponibilidad de recursos de acuerdo con las situaciones que se presenten.

La elaboración de predicciones con menor fluctuación y que apoyen la gestión del tránsito aéreo es la principal meta de integrar la información histórica en la toma de decisiones, lo cual tendrá un efecto significativo en la toma de decisiones y el plan de acción. La brecha de conocimiento existente corresponde a la falta de actualización de parámetros para la sectorización utilizada por CENAMER, por lo que se espera contribuir al rubro con el análisis estadístico necesario para tener una perspectiva diferente a la actual.

Mediante la aplicación de modelos predictivos, es posible apoyar la toma de decisiones operativas y de planificación para el centro de control; esto permitirá el uso de herramientas de análisis para estructurar los datos, consideración de variables para los modelos predictivos, mayor confianza mediante proyecciones futuras para constituir un proceso, así como un entorno basado en datos para la revisión continua de parámetros e indicadores. Para poder comprender de mejor manera la relación existente entre la problemática, las causas, los factores y el efecto, podemos utilizar el siguiente diagrama:



**Ilustración 1. Análisis de consecuencia de la falta de optimización sectorial**

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

Describiendo la situación actual, se identifica que los factores exógenos y la variabilidad de las proyecciones causan distorsión en la percepción de las acciones a tomar para la gestión de tránsito aéreo. Las variaciones existentes son causadas a raíz de falta de información en su mayoría, lo cual ocasiona que un estimado del 20% de las operaciones sean conflictivas al momento de asignar a los sectores; este problema afecta las opciones establecidas por el aplicativo ATFM, el cual se guía por los pronósticos, pero no toma en consideración otros factores exógenos, lo que causa que no se realicen ajustes para la optimización de las gestiones.

Considerando la problemática, se menciona que el aplicativo debería proporcionar alternativas respecto a la sectorización o control manual para poder ajustar estos parámetros al momento de identificar elementos influyentes y de esta manera evitar una distribución desproporcional. La falta de flexibilidad al momento de gestionar los procesos causa que el uso de nuevas técnicas o propuestas no se vea reflejado en el diario vivir; sin embargo, la falta de innovación causa que las prácticas, si bien se rigen por el lineamiento, no progresen con las necesidades actuales.

La investigación busca identificar las variables que actualmente agregarán valor al modelo, mejorando de esta manera las proyecciones y teniendo un contexto abierto de los diferentes elementos externos que pueden tener influencia en las operaciones. Se desea promover, en aras de la mejora continua, una perspectiva que potencialice la innovación mediante retroalimentación de usuarios para gestionar la capacidad de respuesta en los servicios de tránsito aéreo. Actualmente, la sectorización presenta dificultades para adaptarse a los cambios; debido a esto, mediante la planificación sustentada en datos y haciendo uso de la analítica y proyecciones se espera brindar consideraciones que promuevan una distribución balanceada para el periodo 2026.

### **2.1 MACROENTORNO**

#### **2.1.1 COLOMBIA**

En la Resolución 904 del 2012 en Colombia, que trata acerca de las tarifas y políticas aéreas nacionales e internacionales, se adoptó una norma en la que los operadores son libres de establecer sus tarifas y sin ninguna restricción por parte de la autoridad aeronáutica. Esto ha promovido la aplicación de diferentes modelos de negocios que dan al usuario la oportunidad de escoger de

acuerdo con sus necesidades. Lozano Armótegui (2024) establece que esto ha generado la competencia en el mercado de las aerolíneas de bajo costo, donde se busca transformar los servicios de acuerdo con lo que los usuarios están dispuestos a pagar. Al haber más competidores en el mercado, se infiere la posibilidad de tener mayores operaciones en el control de tránsito aéreo.

Lozano Armótegui (2024) nos indica en el estudio realizado en Colombia acerca de los factores y determinantes del incremento de pasajeros en el transporte aéreo, que se debe al crecimiento y estabilidad económica que ha tenido el país. Esto ha brindado apertura para que nuevos competidores apliquen innovaciones o modelos de negocios atractivos que incentiven la dinámica en la oferta y servicios aeronáuticos más asequibles, permitiendo al usuario mayores opciones. Por medio de series de tiempo, se determinó que existe una relación entre la cantidad de personas que utilizaron transporte aéreo y el producto interno bruto del país Colombia. Se puede inferir la relación del factor económico y el crecimiento del transporte aéreo.

En el aspecto social, se ha determinado un incremento en el ingreso per cápita en Colombia según el Banco de la República y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística en el Plan Colombiano de Seguridad Operacional (2022). Esto ha permitido a las personas tener acceso a servicios de transporte en el rubro de la aviación, lo cual ha generado un aumento de operaciones en el control de tránsito aéreo, así como de pasajeros extranjeros y domésticos. En este sentido, la demanda del tráfico aéreo y el comportamiento de la población son elementos vitales para considerar en la seguridad operacional, ya que la actividad de las operaciones depende del movimiento de los seres humanos.

El sector tecnológico ha visto la adopción y uso de drones en el sector aeronáutico de Colombia en áreas comerciales, estatales o para recreación. López Aragón (2023) establece la necesidad de sistemas e infraestructura para operaciones de baja altura para los drones con la finalidad de tener delimitado el espacio aéreo, reglamentando la altitud a la que pueden operar estas tecnologías sin afectar operaciones del tránsito aéreo. Por lo tanto, la propuesta se basa en el uso de inteligencia artificial, así como en la automatización para apoyar el proceso de identificar conflictos, optimizar rutas o gestionar la capacidad de respuesta sin afectar las operaciones del tráfico aéreo ni otra actividad de la población.

El uso de drones puede contribuir a los objetivos de sostenibilidad en la aviación ya que ayudaría a reducir el consumo de energía en operaciones cortas, así como la disminución de la

huella de carbono en las operaciones comerciales del tránsito aéreo. López Aragón (2023) establece que, para la adopción de esta tecnología, se requiere atención a la gestión energética y de interacción con el entorno, ya que estos dispositivos dependen de baterías e interfieren con las rutas de las aves. Por lo tanto, la planeación estratégica para un espacio aéreo de baja altura y optimización de rutas para menor consumo energético son de los factores fundamentales de la propuesta para la gestión del tránsito aéreo.

En el ámbito legal, el Plan Colombiano de Seguridad Operacional es un soporte importante para la aviación civil en Colombia. Plan Colombiano de Seguridad Operacional (2022) resalta los aspectos clave de los estándares y buenas prácticas recomendadas de la OACI, donde se determina la implementación obligatoria del Safety Management System (SMS). En este sentido, el plan solidifica el rol del Estado para garantizar la parte jurídica en la seguridad aérea. Esto conlleva la vigilancia continua de los planes de acción, evaluación de riesgos y auditoría en los procesos aeronáuticos.

### 2.1.2 FILIPINAS

Bajo el estudio de Flordeliza et al. (2024), se ha determinado que el aumento en las operaciones de tránsito y la presión en los controladores de Filipinas para cumplir con la demanda del tráfico, se identifica la necesidad de políticas para garantizar la seguridad operacional y eficiencia en las operaciones. La investigación acerca de los controladores en Civil Aviation Authority of the Philippines (CAAP) demuestra la necesidad de regulaciones y planes operativos para fortalecer al personal. Basado en el estudio, se determinó que la formación del personal y los años de experiencia influyen en la eficacia del sistema, lo que implica que las políticas deben apoyar la capacitación continua para la sostenibilidad en la gestión del tránsito de Filipinas.

Para el crecimiento y desarrollo económico de un país, el transporte aéreo es estratégico para la conectividad y generación de ingresos. En este caso, el estudio basado en el transporte aéreo en Filipinas, país compuesto de más de 7,000 islas, Francisco & Lim (2022) argumentan que la contribución directa de este rubro al PIB del país corresponde a 0.61% en 2019, como generador de comercio, manufactura y turismo. La investigación establece que una manera para maximizar los beneficios es contar con una infraestructura aérea eficiente, donde se han identificado limitaciones en referencia a la tecnología y capacidad de respuesta.

Morata Pérez (2023) establece que los motivos principales para que no se llevara a cabo la

implementación de la tecnología de Vigilancia Automática Dependiente – Difusión (ADS-B) en el espacio aéreo de Filipinas se dieron por temas de documentación en la seguridad operacional y por la densidad aérea, la cual es menor en comparación con otras regiones. Esta tecnología tiene el objetivo de mejorar la capacidad y eficiencia en los sistemas de aviación, proveyendo una capa adicional de seguridad en el monitoreo y vigilancia de las aeronaves. El estudio indica que para 2030, con el crecimiento en las operaciones del control de tránsito aéreo, se prevé la necesidad del ADS-B en el espacio aéreo de Filipinas.

Francisco & Lim (2022) argumentan que la referencia legal del transporte aéreo de Filipinas se encuentra en una etapa de actualización y reforma, donde el gobierno tiene la obligación de fortalecer mecanismos de supervisión y regulación del sector aeronáutico. La ley Philippine Airports Authority (PAA) es una iniciativa para unificar autoridad regulatoria sobre la infraestructura aérea. Así mismo, se mencionan las Enmiendas a la Carta de la Autoridad de Aviación Civil de Filipinas como el proyecto HB 8700 que busca corregir falencias en la supervisión de la entidad civil y fortalecer mediante la estandarización de procesos y estabilidad institucional.

### 2.1.3 NIGERIA

En el ámbito político, la industria y el sector aeronáutico de Nigeria se han desarrollado mediante la revisión y monitoreo de la seguridad, donde la modernización se basa en el soporte y apoyo de los diferentes órganos e instituciones (Aliche et al., 2025). El autor destaca que un Sistema de Administración Amplio de Información (SWIM) brindaría soluciones en el uso digital de información aeronáutica, pero necesita que las instituciones del gobierno, entes reguladores y proveedores en los servicios de Air Traffic Management (ATM) estén alineados. Por lo tanto, la implementación de esta herramienta tiene dependencia de las regulaciones y políticas para respaldar la ejecución e inversión en los sistemas de navegación, comunicación y vigilancia.

El factor económico en Nigeria tiene un componente relevante que genera alrededor de 61,000 empleos en lo expuesto por Obioma (2013). Este es el sector de transporte aéreo, que ayuda al crecimiento económico del país mediante el comercio y la conectividad de distintas regiones. En este sentido, el control de tránsito aéreo tiene una presencia importante para sostener las operaciones, manteniendo un espacio aéreo ordenado y así facilitar el movimiento continuo de personas y cargas en las distintas conexiones.

En un enfoque social, las operaciones del transporte aéreo van ligadas directamente con la provisión del servicio del control de tránsito aéreo. Obioma (2013) argumenta que este rubro fomenta el desarrollo nacional, generando empleos y movilidad de los pasajeros en Nigeria. Por lo tanto, la confianza del sistema de gestión aéreo tiene relación directa con la percepción del público acerca de la seguridad y calidad de servicio en el transporte aéreo. El crecimiento de este sector demanda que las operaciones sean eficientes y seguras para satisfacer a los usuarios.

Basado en la actualización de los sistemas de gestión de tráfico aéreo, se identifican los desafíos y retos que enfrenta Nigeria en la provisión de los servicios de tránsito aéreo al estar fragmentados los sistemas de información aeronáutica en lo argumentado por Aliche et al. (2025). Esto afecta la toma de decisiones en tiempo real, así como la eficiencia en las coordinaciones del tránsito. Por lo tanto, un sistema integrado de datos facilitaría la distribución de información en tiempo real, comunicación directa entre sectores y estaciones de control con el objetivo de reducir tiempos de espera.

La sugerencia del uso de un sistema de información aeronáutica por Aliche et al. (2025) argumenta que ayudaría a la optimización de información para reducir pasos que no generan valor en las coordinaciones aeronáuticas en Nigeria. Esta gestión permitiría el uso de rutas que ayuden a reducir el consumo de combustible que va ligado a la reducción de emisiones a la atmósfera. Para el factor ambiental, el uso de tecnologías en los sistemas del control de tránsito aéreo representa oportunidades para ahorro de energías, apoyando el medio ambiente y la búsqueda continua de la eficiencia en las operaciones.

Para la evolución del sector aeronáutico y servicios de tránsito aéreo en Nigeria se destaca la dependencia de las regulaciones y supervisión de los órganos institucionales (Aliche et al., 2025). La aplicación de un sistema tecnológico para la coordinación de información aeronáutica requiere de políticas, normas y marcos reguladores que garanticen la seguridad en la información y gobernanza de datos. La implementación y desarrollo de sistemas tecnológicos estará condicionado a los requerimientos legales con enfoque en la protección de datos, certificaciones y cumplimiento en temas de ciberseguridad.

## **2.2 MICROENTORNO**

### **2.2.1 COSTA RICA**

Para el año 2028, se espera que la demanda de pasajeros en el sector del tráfico aéreo en Costa Rica se proyecte por aproximadamente 2.23 millones de personas, superando la cifra de aproximadamente 2.09 millones en el 2023, lo que representa un crecimiento anual de 1% de acuerdo a ReporterLinker (2024). Esto sitúa al país en el ranking global en la posición 77 de pasajeros, superado por Luxemburgo con una cantidad similar a la de 2.09 millones de pasajeros, donde se destaca el flujo de operaciones en la región centroamericana.

La gestión de tecnologías en los sistemas de tráfico aéreo ha permitido incrementar la capacidad de gestión de vuelos, mediante la modernización del sistema de tráfico y vigilancia aérea. INDRA (2018) es responsable de cerca del 70% de proveer sistemas a los centros de control de Latinoamérica. Indra y COCESNA han completado la gestión de modernizar el sistema de tráfico aéreo y vigilancia de Costa Rica, permitiendo manejar mayor afluencia de tránsito, potenciando el turismo en el país.

Para la sección del poder de negociación que existe de los compradores del servicio del control del tránsito aéreo en Costa Rica, se argumentan las interacciones que han tenido estos respecto a condiciones de trabajo, salarios y el personal. Esto se debe a que los agentes involucrados en este servicio, como ser el Estado y las aerolíneas, pueden influir de manera directa en la prestación del servicio y la satisfacción de los clientes.

La amenaza de nuevos entrantes para la región de Costa Rica es muy baja debido a las regulaciones e infraestructura que conlleva la prestación del servicio de tránsito aéreo. Esto indica que es un sector que tiene características particulares como economías de escala y altos costos operativos que dificultan el reemplazo del proveedor principal de este servicio.

### **2.2.2 EL SALVADOR**

El Salvador se ha convertido en uno de los mercados más competitivos de la región debido al crecimiento de operaciones en el tráfico aéreo. Se estima que en el 2024, el Aeropuerto Internacional de San Oscar Arnulfo Romero registró más de 5 millones de pasajeros, lo que es evidencia de las conexiones aéreas y apertura de nuevas rutas (Alas, 2025). La demanda y exigencia de que los servicios de tránsito aéreo operen de manera eficiente y segura representan una

posibilidad para que las agencias y aerolíneas tomen decisiones basadas en el servicio ofrecido.

El poder de los compradores en el rubro del control de tránsito aéreo en El Salvador es importante por el crecimiento en la demanda que se refleja en una cifra cercana a 5 millones de pasajeros en 2025. Esto se traduce en lo económico en aproximadamente \$1,500 millones de ingresos al PIB de El Salvador, generando alrededor de 118,000 empleos según lo que establece la Alas (2025) al expresarse sobre los acontecimientos del ámbito aeronáutico salvadoreño.

La Asamblea Legislativa (2023) en el marco de la reducción de barreras burocráticas en el sector aeronáutico, estableció la actualización de la Ley Orgánica de Aviación Civil en El Salvador. Esta moción permite la dinámica para que nuevos entrantes busquen competir en el mercado. Pero debido al rubro en el que se maneja especialización técnica y requisitos escritos de certificación de personal y equipos, se mantiene una barrera para ser un competidor en el rubro del control de tránsito aéreo, lo que reduce nuevos proveedores.

### 2.2.3 GUATEMALA

En el proceso del poder de negociación de proveedores se identifica que es alto por los sistemas de gestión de tráfico aéreo, ya que se requiere de equipo especializado para atender las operaciones y es poco en la región. INDRA (2023) establece el proyecto regional para modernizar y unificar sistemas de gestión de tránsito aéreo en Centroamérica en un valor de 24.6 millones de euros. Esto refleja la dependencia de Guatemala y los países en la región para la integración de soluciones tecnológicas en la provisión del servicio ATC.

Los compradores tienen una participación de negociación moderada donde se identifican las aerolíneas, agencias de viajes y compañías aéreas. El transporte aéreo que va ligado al servicio ATC en Guatemala es de relevancia en el sector económico, representando 740.5 millones de dólares de acuerdo con IATA (2023a), generando alrededor de 61,800 empleos en el país. Esto representa una exigencia para las autoridades y encargados del servicio ATC para que sea puntual, eficiente y seguro. Los compradores pueden exigir mejoras en la capacidad de respuesta y mantener un flujo continuo, reduciendo tiempos de espera.

El servicio de tránsito aéreo, al ser un servicio sujeto a regulaciones y políticas del Estado e internacionales, la amenaza de nuevos entrantes se identifica como baja para Guatemala. La Dirección General de Aeronáutica Civil de Guatemala (DGAC, 2025) argumenta la inversión

extensa en infraestructura y requisitos en personal calificado para poder operar en este rubro. Se considera que los planes de acción para la actualización de los sistemas ATC, así como la capacitación recurrente de los controladores de tránsito aéreo evidencian la dificultad de nuevos entrantes.

#### 2.2.4 HONDURAS

Para el ámbito nacional, los servicios de control de tránsito aéreo están regulados por la AHAC y la rivalidad se refleja a través de las operaciones entre los aeropuertos internacionales, países de la región y aerolíneas para atraer nuevas rutas. El sector aeronáutico en Honduras se refleja en un crecimiento del 53.7% en la última década, lo que se traduce en \$666.4 millones al PIB (1.9%) y ha generado alrededor de 89 mil empleos en el país de acuerdo con IATA (2023). En este sentido, hay una responsabilidad sobre los servicios de tránsito aéreo, ya que es una oportunidad para generar confianza en los usuarios.

Para proveer servicios de tránsito aéreo, es indispensable contar con equipos y tecnología (Comunicación, Navegación & Vigilancia / Gestión del Tránsito Aéreo) CNS/ATM. El alto costo para adquirir estos equipos, certificaciones del personal, costos de mantenimiento, entre otros requisitos, hace que solo se encuentre un número limitado de proveedores a nivel mundial, lo que fortalece el poder de negociación. El incremento de tránsito justifica la actualización estructural en estos equipos para poder dar respuesta a las exigencias del mercado en las operaciones de tránsito aéreo en el país hondureño, como lo establece IATA (2023).

Los compradores de esta sección se basan en las aerolíneas y operadores de vuelo, los cuales tienen un poder de negociación elevado debido al crecimiento del tráfico aéreo. En Honduras se registra la operación de 20 aerolíneas y de acuerdo con las memorias elaboradas por IATA (2023), se llevan a cabo alrededor de 27 vuelos internacionales de frecuencia diaria. Se identificó una disminución del 39% en tarifas del transporte aéreo entre los años 2011 y 2023. Esto da apertura a que los compradores tengan la potestad de decidir basada en la calidad de servicio recibido, puntualidad y seguridad del servicio ATC.

**Tabla 3. Análisis de fuerzas de Porter de cuatro países centroamericanos**

Fuerza de Porter	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras
Rivalidad entre competidores	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Poder de negociación de los proveedores	Alto	Medio-Alto	Alto	Alto
Poder de negociación de los compradores	Medio-Alto	Alto	Medio	Alto
Amenaza de nuevos entrantes	Bajo	Bajo-Medio	Bajo	Bajo
Amenaza de productos sustitutos	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia

### 2.3 CONCEPTUALIZACIÓN

Contextualizando las funciones de cada variable para el estudio, detallamos las dimensiones a interpretar dentro del análisis para la definición conceptual y operativa; estas se definen de la siguiente manera:

La sectorización del espacio aéreo es necesaria para mantener un balance de la carga de trabajo para un controlador de tránsito aéreo y así evitar saturaciones que impidan atender las solicitudes de los pilotos de acuerdo con Valientes Palacios (2007).

Para la presente investigación, la sectorización del espacio aéreo representa la configuración dinámica o estándar en el centro de control de CENAMER con la finalidad de mantener un balance en la distribución de carga y la fluidez del tránsito en determinado sector de control para la provisión de servicios de vigilancia y navegación.

De acuerdo con el proyecto de la modernización pública en el sector aeronáutico de D'Agostino & Piarrou (2011), un plan de vuelo electrónico es presentado por el piloto, despachadores o responsable previo a la salida de operación de un vuelo que contiene la información pertinente a la ruta, nivel de crucero, capacidades de navegación y comunicación de la aeronave, aeródromos de salida y destino, entre otros.

El plan de vuelo electrónico contiene un identificador único que representa el registro de una operación para la gestión del tránsito en la presente investigación. Por lo tanto, el plan de vuelo electrónico se entenderá como el dato para determinar la cantidad de operaciones que hay en determinado día de acuerdo con los registros históricos operacionales.

De acuerdo con Rodríguez García (2021), la milla náutica es la unidad de medición utilizada para determinar la distancia recorrida de las aeronaves y se usa de comparativo para los diferentes

tipos de aeronave y su gasto de combustible en su autonomía y recorrido.

La definición operativa de millas náuticas para la presente investigación se entenderá como el recorrido registrado de las aeronaves en sus trayectorias en el espacio aéreo de Centroamérica. En este sentido, se utilizará para determinar qué tipos de aeronaves tienen mayor recorrido basado en los datos históricos.

En una investigación realizada por Viegras et al. (2000), se detalla “Proyección” como la información financiera proyectada con respecto al futuro en la que se tiene razonable confianza (pero no se está razonablemente seguro de alcanzar).

Para la presente investigación, la proyección representa la cantidad futura de operaciones en el control de tránsito aéreo, lo cual refleja los pronósticos de vuelo en las fechas venideras para la planificación operativa en los sectores de control.

## **2.4 TEORÍAS DE SUSTENTO**

### **2.4.1 BASES TEÓRICAS**

#### **2.4.1.1 TEORÍA DE DEMANDA Y OFERTA**

Dado que el sistema de control aéreo no corresponde a un modelo lineal, sino a un modelo dinámico, se tienen que considerar demás factores para su posible análisis.

Haciendo referencia a uno de los principios fundamentales económicos, dentro del mercado existe una relación de demanda y oferta donde las variaciones entre estos tienen un efecto proporcional en su contraparte (Ricardo et al. 2004). La teoría económica actual tiene efecto en los modelos de control aéreo mediante las consideraciones entre la demanda y la oferta existente. COCESNA, siendo el organismo que provee servicios de navegación aérea en la región y teniendo características monopolísticas debido a ser una institución de servicio único designada por los acuerdos regionales de control aéreo, tiene elasticidad nula debido a la necesidad de las gestiones de alta elevación de pasar por los sectores correspondientes.

Económicamente, la teoría de demanda y oferta plantea que el equilibrio de estas existe cuando la oferta y demanda tienen valores iguales; sin embargo, al aplicar esta al rubro de control aéreo, se debe tener en consideración que debido a características como personal certificado, regulaciones internacionales, disponibilidad de espacio aéreo y demás, la teoría debe ajustarse a un modelo que no permite el ajuste libre de las fuerzas. Debido a esto, el modelo existente no

corresponde meramente al balance de oferta y demanda, sino a una demanda suplida por capacidades seguras, las cuales pueden incrementar o cambiar según la necesidad, pero no serán forzadas según la demanda existente.

El rubro tiene consideraciones sobre el personal y los recursos a disposición para suplir la demanda; sin embargo, al estar enterados de que este servicio no puede aumentar su oferta instantáneamente, la posibilidad de suplir una demanda sin optimizar el proceso se puede considerar como imposible, por lo que existe una necesidad de facilitar y mejorar los procesos. Dentro del rubro existen variaciones en las operaciones, generalmente por factores que impliquen cambios en el comportamiento de los vuelos, por lo que es necesario factorizar estos conceptos para poder maximizar el uso de recursos y de la misma manera optimizar las operaciones de un modelo que no permite un ajuste inmediato.

Considerando el efecto de la teoría en CENAMER, es importante mencionar que, debido a las limitaciones, las implicaciones económicas se ven reflejadas en relación con los cambios o la variación respecto a la planificación; Considerando una supuesta desviación del 15% en las operaciones, la planificación de esto se vuelve compleja, y al no agendar de manera apropiada en diferentes situaciones la tendencia operativa de crear excedentes de oferta se convierte en la mentalidad utilizada para situaciones de incertidumbre. En estas situaciones, la disponibilidad de recursos se convierte en la única limitante para suplir la mayor cantidad posible de la demanda, por lo que se deberá tomar en cuenta factores como capacidad de respuesta, sectores habilitados y demás conceptos que se vean afectados por la optimización de la gestión.

Ejemplificando la teoría de manera aplicada, se detalla que, considerando la limitación de oferta, la subutilización de recursos se presenta como una de las mayores problemáticas; para CENAMER, la obligatoriedad del servicio fuerza al área a cumplir con la demanda, por lo que la subutilización de recursos o una distribución proporcional representa una pérdida económica para la institución. En este mercado, donde el equilibrio de la demanda y oferta se ve limitado por factores externos, la optimización de recursos en la curva de producción es relevante para la maximización de ingresos y la minimización de pérdidas de oportunidad y costos, por lo que encontrar la distribución óptima es importante para las métricas.

La pérdida de bienestar para la institución se relaciona principalmente con la falta de capitalización de los recursos existentes; considerando la variable de capacidad, las dimensiones

del personal y la capacidad de respuesta, se presentan claros ejemplos de la limitación dentro de un mercado semilibre. Si en determinada situación la demanda tiene 100 operaciones y por cada centena de operaciones se requiere un operador, considerando que tenemos un máximo de 5 operadores, 500 operaciones serían el punto óptimo, con una distribución pareja; en caso de tener 550 operaciones, debido a las limitantes, solo se podrán atender 500 operaciones. Por otro lado, de tener 400 operaciones y utilizar 5 operadores, estaríamos subutilizando los recursos institucionales.

#### 2.4.1.2 TEORÍA DE COLAS

García Sabater (2016) introduce la teoría de colas como aquella que disminuye o elimina la congestión de un determinado servicio, minimizando la pérdida de tiempo debido a ineficiencias o excesos de capacidad. Esto quiere decir que, complementando la demanda y oferta, si se presentan limitaciones como en el rubro aeronáutico, la teoría de colas sirve para optimizar la secuencia de un sistema o servicio. Esta teoría se puede representar de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Donde de manera aplicada, la llegada de aeronaves sobre la capacidad de los controladores sería igual al índice de utilización; por medio de esta, matemáticamente se obtienen resultados de la eficiencia del uso de recursos, donde un índice inferior a 0.60 indica subutilización, entre 0.60 y 0.75 se tiene un óptimo operativo, entre 0.75 y 0.85 se considera un nivel crítico y de 0.85 en adelante se tiene un exceso.

Dentro del rubro aeronáutico, donde la demanda y oferta no se encuentran en un balance libre y la optimización del servicio se presenta como la mejor alternativa para suplir la demanda existente, es necesario tener presente que la capacidad declarada no equivale a la capacidad sostenible. En un ámbito de productoras, la maquinaria rara vez opera al 100%, esto se debe al desgaste que produce y que las operaciones se deben ajustar a la demanda; similar a esto, si bien los operadores pueden atender 150 operaciones como máximo, este ritmo no será sostenible y en el caso de los sectores, el uso de estos en el máximo es únicamente permisible cuando este máximo no representa exceso de producción.

La creación de sistemas efectivos es necesaria para la optimización de las operaciones, al no ser eficientes, estas operaciones se convierten en tiempo muerto, lo cual representa una pérdida; cuando estos sistemas generan pérdidas se registra un egreso de recursos no justificable por lo que

la subutilización o exceso se vuelven conceptos que se ligan a la pérdida de bienestar económico correspondiente a la falta de uso apropiado de recursos.

#### 2.4.1.3 TEORÍA DE OPTIMIZACIÓN DE REDES

La teoría consta del estudio de la relación y construcción de estructuras entre conjuntos de datos (llamados nodos) por medio de los vínculos (arcos); las ventajas de esta teoría corresponden a una facilidad de expresión de la estructura de una situación y una visión completa del panorama del problema, la cual representa una perspectiva más práctica para el razonamiento (Escobar et al., 2013). Esta teoría es importante para el estudio debido a la relación existente con las dos teorías previas, siendo esta una manera de representar el contexto y flujo del tránsito aéreo.

La teoría funciona con la perspectiva de elaborar una fórmula matemática para la optimización restringida establecida por la teoría de la demanda en este mercado; considerando que dentro del sistema existen sectores sobrecargados y subutilizados, se utiliza esta teoría para medir el desbalance existente dentro del sistema. Considerando esto, la estructura de la distribución ATS bajo esta teoría correspondería no a la más rápida sino a la más estable, lo cual se alinea con el planteamiento de una reducción de la capacidad nominal del 10% para evitar saturación y tener un margen adicional en caso de requerirlo.

#### 2.4.1.4 TEORÍA DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Llanes-Font & Lorenzo-Llanes (2021) en el marco de la investigación acerca de la cuarta revolución industrial y demás aliados en la gestión empresarial, establecen que las disrupciones y oportunidades generadas por las tecnologías han permitido que los tomadores de decisiones puedan contar con información detallada y al instante para evaluar aspectos en la cadena de valor donde se encuentra la interacción del producto o servicio que se ofrece al mercado. Para adaptar esta teoría, el autor resalta la necesidad de la transformación digital en las organizaciones para reducir pérdidas o fallas en el proceso organizacional.

### 2.5 ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS

Para el siguiente apartado, es necesario conocer las metodologías previamente aplicadas por los autores de investigaciones en el control de tránsito aéreo. Así mismo, se desea conocer la coherencia, validez y sustento con el cual fueron desarrolladas las investigaciones pasadas por mencionar y la aproximación utilizada para abordar una solución y propuesta de mejora.

En la investigación de Asán Caballero et al. (2022) basada en algoritmos de predicción de series de tiempo para generar proyecciones del tráfico aéreo por medio del uso de redes neuronales, se destaca por la contribución a la inteligencia artificial y analítica predictiva. La metodología empleada involucra un estudio cuantitativo con diseño no experimental, ya que no hay presencia de manipulación de variables y se trabaja con datos históricos para generar las predicciones. El trabajo consiste en modelar y hacer la comparación de diferentes algoritmos para evaluar los mejores resultados de estos. Cabe mencionar que el alcance de la investigación es descriptivo, basado en analizar patrones en las series de tiempo y describir el comportamiento del tráfico aéreo.

En el marco de análisis de series de tiempo, se destaca la investigación de López (2018) relacionada al pronóstico de demanda de uso de aeropuertos en Argentina. La investigación se basa en datos históricos, así como numéricos para utilizar modelos estadísticos y de aprendizaje automático para generar predicciones. El enfoque es de tipo no experimental – longitudinal ya que utilizaron datos históricos y se describe la comparación de diferentes modelos de series de tiempo como ser ARIMA, Holt-Winters y redes neuronales para generar una predicción a 60 meses para todos los aeropuertos de Argentina.

La investigación realizada por Iza Quishpe (2021) analizó los patrones generados por la dispersión de datos en un plano, por el cual pudo definir las diferentes relaciones existentes entre las variables para un análisis basado en regresiones polinomiales (p.8). El propósito principal es predecir la demanda futura a partir de datos históricos, teniendo un enfoque cuantitativo y no experimental. Se evidencia el alcance descriptivo y explicativo, ya que se enfoca en analizar la dispersión de los datos, así como determinar las relaciones entre las variables mediante el uso de la regresión.

El estudio de López et al. (2017) se diferencia de los trabajos previamente mencionados en que emplea herramientas econométricas y la modelación económica para describir variables de mercado, demanda e indicadores. El análisis de datos y variables numéricas lo hacen un estudio cuantitativo y de diseño no experimental, ya que se trabaja con datos secundarios sin manipular variables. En el proceso de predecir la cantidad de pasajeros de tráfico aéreo en España, se utilizan modelos de SARIMAX con la finalidad de anticiparse a la toma de decisiones y la implementación de políticas económicas, siendo un país líder en el sector turístico. Por lo tanto, la investigación contribuye a la modelación econométrica de datos y a resultados prácticos en teoría económica.

Para finalizar, la investigación de Bustos et al. (2022) enfocada en predecir las operaciones aéreas para optimizar la turnicidad de los controladores de tránsito aéreo en un aeropuerto de Colombia se enmarca en la aplicación de la analítica predictiva y en el uso de modelos de series de tiempo para el pronóstico de la demanda futura, utilizando datos históricos. Las características mencionadas hacen que la investigación sea de enfoque cuantitativo y diseño no experimental, anticipando el comportamiento futuro de las operaciones y apoyando la planificación estratégica en los turnos.

## **2.6 ANTECEDENTES DE METODOLOGÍAS**

La evaluación detallada de las investigaciones previas que han realizado los autores acerca del rubro en la aviación permitió identificar los enfoques, diseños, técnicas y modelos utilizados para entender la metodología aplicada en el campo de estudio. Por lo tanto, en la secuencia de los antecedentes metodológicos, se exponen los métodos, modelos y la descripción de lo que han realizado los investigadores en el pasado.

En la revisión de literatura e investigaciones acerca de los antecedentes metodológicos en el rubro de aviación y control de tránsito aéreo, (Pérez et al. 2020) destaca el enfoque documental y analítico para identificar patrones y resultados de la aplicación de modelos SARIMA para contrastar la sensibilidad del tránsito aéreo al ciclo económico y también relacionado al efecto de los impactos exteriores sobre la demanda del tránsito aéreo en España. Por lo tanto, la implementación de esta metodología permitió la síntesis de resultados que, en conjunto con los enfoques, logró fortalecer la información relevante para futuras investigaciones.

La investigación de (Arteta Heins & Montes Rodríguez, 2024) aplica una metodología con enfoque cuantitativo en el proceso de modelar series de tiempo para la proyección de operaciones en el rubro de aviación. Se utilizaron datos históricos acerca de vuelos nacionales, así como internacionales en Colombia y tomando en consideración variables como el Producto Interno Bruto (PIB), socioeconómicas y tasas de empleo para mejorar la precisión de los modelos para la predicción. Así mismo, se identifica un enfoque comparativo para evaluar el rendimiento de los diferentes modelos como ser Holt-Winters, SARIMAX y SARIMA.

A partir de la secuencia de antecedentes metodológicos, el estudio de Girón Girón (2023) emplea un enfoque cuantitativo para la proyección de la demanda de viajeros en el aeropuerto colombiano de El Dorado. Se propuso un modelo de regresión lineal simple para relacionar la

demanda y variables explicativas y otro modelo combinado con regresión lineal junto al modelo gravitacional para integrar variables de interacción entre la afluencia de la red de tránsito y la ciudad, como ser variables macroeconómicas como el PIB. La finalidad del procedimiento fue dar explicación a la demanda de pasajeros y características regionales mediante el análisis de las redes de transporte y territoriales.

En el último trabajo de antecedentes metodológicos, Reyes & González (2022) aplican técnicas de aprendizaje automático, siempre en el rubro del tránsito aéreo pero orientado a predecir la intensidad del viento a diferentes altitudes y niveles de vuelo, utilizando datos históricos entre 2015 y 2020 de mediciones de radiosondas. En la metodología empleada con enfoque cuantitativo, se realiza la evaluación de modelos predictivos donde el modelo de Gradient Boosting Tree obtuvo el mejor desempeño para predecir la intensidad del aire entre un conjunto de diez modelos evaluados. Se destaca el entrenamiento, evaluación y validación de los modelos con la incorporación de análisis probabilístico con umbral de dos veces sigma y un 95% de probabilidad para la confiabilidad en el uso de las predicciones en términos operacionales.

A continuación se brinda la matriz de coherencia vertical acerca de los modelos, variables, autores y resultados de las investigaciones previas:

**Tabla 4. Análisis comparativo de metodologías en previas investigaciones**

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Modelo Utilizado</b>	<b>Variables</b>	<b>Diseño y Enfoque</b>	<b>Resultados</b>
Asán Caballero et al.	2022	Redes neuronales / Inteligencia Artificial	Instancias históricas de tráfico aéreo	Descriptivo no experimental / Cuantitativo	Brinda una alta capacidad predictiva y permite la detección de patrones complejos relacionados al comportamiento del tráfico aéreo.
López	2018	Modelo predictivo ARIMA, Holt-Winters y Redes neuronales	Grado de demanda Aeroportuaria	Longitudinal no experimental / Cuantitativo	Genera predicciones a largo plazo (60 meses) y utiliza la comparación de modelos para complementar información.
Iza Quishpe	2021	Regresión polinómica	Dispersión de demanda	No Experimental / Cuantitativo	Facilita la Identificación de relaciones entre variables con efecto en la demanda.
López et al.	2017	Modelo predictivo SARIMAX y modelos econométricos	Predicción de variables económicas	No Experimental / Cuantitativo	Genera predicción de pasajeros y apoya en la integración de políticas económicas relevantes al tema.
Bustos et al.	2022	Modelo de Series de tiempo	Proyección de Operaciones aéreas	No Experimental / Cuantitativo	Integra la Optimización de turnos de controladores mediante proyecciones para el control aéreo.
Pérez et al.	2020	Modelo predictivo SARIMA y Revisión documental-analítico de recursos varios	Predicción y comparativos de Tráfico aéreo vs ciclo económico	Documental no experimental / Cuantitativo	Explica la relación entre demanda de gestiones aéreas y factores macroeconómicos que tienen efecto en el comportamiento del mercado.
Arteta & Montes	2024	Modelo predictivo SARIMA, SARIMAX y Holt-Winters	Resultados de PIB, empleo, número de vuelos	Comparativo no experimental / Cuantitativo	Mejora de precisión de los resultados administrativos mediante la inclusión de variables externas y el estudio del efecto.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.7 METODOLOGÍAS, ENFOQUES Y DISEÑOS

A partir de la revisión de la literatura en investigaciones relacionadas a la aviación y el control de tránsito aéreo, se destaca una predominancia de enfoques cuantitativos para la estimación de operaciones. El respaldo de los autores está basado en los datos históricos y la aplicación de modelos estadísticos y de aprendizaje automático con orientación a identificar patrones estacionales y a la predicción de la demanda para tomar decisiones.

En las metodologías aplicadas, se denota el uso de modelos tradicionales, así como avanzados. Relacionado a los modelos estadísticos de series de tiempo, se destacan ARIMA, SARIMAX, SARIMA y Holt-Winters. Estos modelos son productivos para modelar las tendencias y la posibilidad de incorporar variables externas para mejorar el proceso de predicción. Por otra parte, se muestra evidencia del progreso en el uso de modelos y técnicas de inteligencia artificial, así como de aprendizaje automático, como son las redes neuronales y los algoritmos de Gradient Boosting Tree, los cuales tienen una gran capacidad para identificar patrones, así como relaciones no lineales en los datos.

También se mencionan las metodologías en las que se aplicaron modelos de regresión lineal y polinomial con enfoques combinados, como ser los modelos gravitacionales, los cuales integran variables económicas y territoriales. Por lo tanto, este tipo de metodologías expande la apertura de incorporar factores externos en el análisis como el Producto Interno Bruto, factores de turismo y empleos, generando un enfoque multidimensional.

La mayor parte de las investigaciones analizadas se destacan por ser de diseño no experimental – longitudinal, ya que se trabajaron con datos secundarios e históricos y el uso de las series de tiempo para el análisis de las variables. Así mismo, en los diseños comparativos se evaluaron diferentes modelos para seleccionar la opción que más se adapta para apoyar el proceso de precisión en las predicciones.

En resumen, las metodologías y antecedentes analizados evidencian que la predicción de las operaciones en el control de tránsito aéreo tiene fundamento en metodologías cuantitativas con diseños no experimentales – longitudinal. En este sentido, la combinación de modelos tradicionales junto a técnicas de aprendizaje automático y anexar variables externas representa el respaldo en el fortalecimiento de la precisión de los modelos en aras de apoyar las decisiones estratégicas en el sector aeronáutico.

## 2.8 ANÁLISIS CRÍTICO

La investigación realizada por López et al. (2017) forma parte de los antecedentes relevantes para el estudio entre la demanda de servicios de tránsito aéreo y la capacidad de respuesta de los controladores; sin embargo, se presentan limitaciones debido al enfoque metodológico aplicado; los modelos utilizados funcionan como una base con modelos econométricos, la cual carece de la aplicabilidad real y se caracteriza por la variabilidad del tráfico aéreo. Los modelos empleados son de análisis estadístico descriptivo y modelos estáticos, lo cual permite la integración del comportamiento histórico, pero carece de la flexibilidad necesaria para la integración de este modelo en sistemas reales.

Las investigaciones previas no incorporan predicciones dinámicas, por lo que al mantenerse las condiciones establecidas sin cambios dificulta una reflexión precisa de la aeronáutica actual, la cual tiene conceptos como fluctuaciones estacionales, cambios de ruta, cambios de variabilidad en diferentes horarios o la necesidad de balancear el uso del recurso humano apropiado. Este enfoque teórico, si bien funciona para descripciones del fenómeno, no posee la robustez necesaria para ser utilizado como una herramienta fiable debido a que la certeza de los datos no sería óptima.

Los modelos utilizados no incluyeron la necesidad de un análisis sobre el efecto de la carga laboral al controlador; la distribución de los sectores, si bien puede cambiar teóricamente, requiere de operarios que tengan conocimiento de esto y que estén dentro de las capacidades. La propuesta de disminución para una mejor distribución en muchos casos se presentará como opuesta al principio teórico de aumento proporcional en la demanda y oferta, por lo que los estudios previos tenían un enfoque no aplicable con relación a la variable humana que observamos en los CTA hoy en día.

Finalmente, los enfoques previamente listados carecían de medición para la validación de las predicciones o la optimización existente a los parámetros; aun considerando que ninguna de las investigaciones fue de estudio experimental, la teoría aplicada no integró maneras de verificar las aplicaciones de estas en un ámbito real. Los estudios metodológicamente fueron planteados como un explicativo de un fenómeno, por lo que su enfoque teórico difiere del enfoque aplicado en la actual investigación; esto causa que la brecha de conocimiento existente se pueda identificar primordialmente mediante la diferencia en finalidad de los estudios.

## 2.9 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

**Tabla 5. Herramientas de la investigación**

Tipo de Herramienta	Herramienta	Motivo de selección	Aporte al desarrollo de la investigación	Análisis Costo - Beneficio
Planificación	Lucidchart	Capacidad de diseño, mapas mentales y diagramas para la estructura de procesos.	Organización de metodologías y flujos de análisis.	Costo: L.0.00 – L.2,000 Beneficio: Mejoras a la estructuración de trabajo.
Visualización de datos	Google Colab	Integración de librerías de visualización y facilidad en la nube.	Generación de gráficos para interpretar patrones y tendencias de resultados.	Costo: L.0.00 – L. 1,500 Beneficio: Integración de software ajustable.
Análisis de datos	Google Colab	Ejecución de modelos estadísticos, aprendizaje automático y econométricos.	Procesamiento de datos para implementar modelos predictivos.	Costo: L.0.00 – L.1,500 Beneficio: Sustituye software analítico.
Recepción de datos	Microsoft Excel	Versatilidad para la organización de datos.	Estructuración preliminar de los datos.	Costo: ≈ L.500 Beneficio: Alto grado de compatibilidad.
Procesamiento de texto	Microsoft Word	Redacción académica con integración de normas APA.	Estructuración formal del documento para la tesis.	Costo: ≈ L.500 Beneficio: Estandarización de documentos.
Extracción de datos	Aplicativo ATFM	Fuente directa de datos operacionales.	Registros históricos para alimentar modelos predictivos y análisis de series de tiempo.	Costo: L.0.00 (Sistema institucional) Beneficio: Acceso a datos confiables.
Presentación	Microsoft PowerPoint	Exposición clara de resultados de manera profesional.	Comunicación de hallazgos y conclusiones de la investigación.	Costo: ≈ L.500 Beneficio: Mejora la presentación de resultados.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.10 MARCO LEGAL

### 2.10.1 LEGISLACIONES INTERNACIONALES

Las regulaciones internacionales para el tráfico aéreo son gestionadas por los estados miembros de la OACI; estos se encargan de estructurar, coordinar y regir todos los lineamientos pertinentes al tráfico aéreo internacional a nivel mundial. Las regulaciones pertinentes para el ámbito aeronáutico son las siguientes.

**Tabla 6. Legislaciones internacionales**

Instrumento Legal	Año	Descripción	Impacto
Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Reemplazo Doc. 7300/8)	2006	Según OACI (2006), el convenio establecido tiene la finalidad de desarrollar la aviación civil internacional de manera segura y ordenada, estableciendo por medio de este igualdad de oportunidades y realizar las gestiones de modo sano y económico. (p.1)	Manual adaptado de las regulaciones establecidas en 1944 respecto a los lineamientos internacionales para la aviación civil. En este se considera el marco general de la aviación como tal y los procesos que las naciones deben de seguir para poder participar dentro del sistema establecido. Debido a su carácter como guía y ser las regulaciones originales a las cuales los anexos se apegan, el impacto de estas es evidente por su significancia en el ámbito aeronáutico
Prácticas Recomendadas y Estandarizadas. (Anexo 19)	2016	Según OACI (2016a), las disposiciones del Anexo 19 se elaboran en respuesta a las recomendaciones de la Conferencia de directores generales de Aviación Civil sobre una estrategia mundial para la seguridad operacional.” (p.9)	Manual utilizado a nivel internacional para la delimitación de parámetros respecto a la seguridad operacional que debe tener el personal del rubro aéreo en las gestiones relacionadas. Tiene su mayor efecto debido a que mediante estas y las demás regulaciones de la OACI, se establecen las limitaciones correspondientes al personal y demás si se quiere participar dentro del sistema aéreo internacional. De igual manera se menciona que este anexo funciona como la base para la creación de las regulaciones nacionales de cada país; adaptando los lineamientos correspondientes a cada nación, el anexo 19 funciona como el estándar a seguir, lo cual infringe en el territorio de turnos, carga laboral y regulaciones que velan por el bienestar del empleado dentro del ambiente de trabajo.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de (OACI, 2006, p.1), (OACI, 2016a, p.9)

## 2.10.2 LEGISLACIONES NACIONALES

**Tabla 7: Legislaciones Nacionales**

<b>Instrumento Legal</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>	<b>Impacto</b>
Política Estatal de Seguridad Operacional	2024	El despacho de defensa, mediante AHAC (2024) establece en una circular de la disposición de cooperar con el cumplimiento de Programa estatal de Seguridad Operacional, los requisitos y demás consideraciones que se consideren necesarias para seguir los lineamientos OACI. (p.1)	Mediante esta circular se renueva el compromiso de AHAC para seguir los lineamientos establecidos por OACI en el cumplimiento de las gestiones pertinentes para formar parte de la comunidad internacional. Dentro del documento se especifica la resolución para el cumplimiento de las estipulaciones, por lo que da legalidad a nivel gubernamental del propósito a seguir.
Regulaciones de Aeronáutica Civil	2016	“La Regulación de los Servicios de Tránsito Aéreo “RAC-ATS”, se aplicará a todos los Proveedores de servicio que brinden Servicios de Tránsito Aéreo dentro del territorio nacional y en aquellas áreas en que la República de Honduras tenga jurisdicción” (AHAC, 2026, p. 37)	Las RAC, especialmente la concerniente al control de tráfico aéreo, tiene como propósito dar los lineamientos nacionales para la regulación, normas, emisión de licencias al personal aeronáutico y todo lo relacionado a la aviación civil de Honduras.
Ley de Inspección de Trabajo	2017	El artículo 1 estipula que es aplicable a todo el territorio y que la finalidad es la inspección, garantía y seguridad del cumplimiento de las normas y leyes acerca del trabajo & sus condiciones. (La Gaceta, 2017)	La Ley de Inspección de Trabajo en el país busca la equidad, cumplimiento de normas y vigilancia de los aspectos laborales, cerciorándose que ambas partes (trabajador y patrono) cumplan con las responsabilidades adquiridas. De faltar a una disposición, se incurre a una infracción que será penalizado conforme a la ley.

Fuente: Elaboración propia con datos de (AHAC, 2024) , (AHAC, 2016, p.1), (La Gaceta, 2017)

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

### 3.1 ENFOQUE

En la presente investigación se establece un enfoque cuantitativo por el fundamento en el análisis de los datos numéricos e históricos sobre las operaciones de tránsito aéreo. La aplicación de modelos de series de tiempo y de aprendizaje automático para predecir las futuras operaciones permite tener el enfoque mencionado para medir las variables y la evaluación del rendimiento de los modelos por medio de indicadores estadísticos, lo cual es indispensable en investigaciones con orientación a realizar proyecciones.

La revisión literaria en el capítulo anterior ha permitido fundamentar la decisión del uso de metodologías cuantitativas donde se destacan modelos de regresión y de aprendizaje automático para predecir la demanda en el sector aeronáutico por la suficiencia para generar resultados objetivos. Por esta razón, el enfoque cuantitativo tiene relevancia en el control de tránsito aéreo para analizar acontecimientos que se puedan medir de acuerdo con Hernández Sampieri & Fernández-Collado (2014).

#### 3.1.1 MATRIZ METODOLÓGICA

A continuación, se expone la matriz de congruencia acerca de la investigación que conduce a la secuencia lógica y vertical en la siguiente página:

**Tabla 8: Matriz de congruencia**

Título de la investigación	General		Específico		Variables
	Objetivo	Pregunta	Objetivos	Preguntas	
Modelado Predictivo De La Demanda ATS Para La Optimización Sectorial En CENAMER Basado En Datos 2024-2025.	Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025, utilizando recursos (A) disponibles con la información existente, con la finalidad de (R) disminuir la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementado (T) mediante un piloto el cuarto trimestre de 2026.	¿En el (P) personal ATS, la (I) reducción en un 10% en la utilización de los sectores basada en el análisis de la data histórica, (C) comparada con la distribución actual, (O) genera una disminución significativa en la carga laboral durante el periodo 2026?	Analizar (S) los patrones de utilización de sectores mediante métricas estadísticas, (M) detallando el comportamiento de los datos del 2024 al 2025, utilizando información histórica (A) accesible mediante registros operacionales, para la (R) optimización de parámetros de sectorización previo a su implementación (T) en el cuarto trimestre del 2026.	¿(I) La modificación de parámetros de la capacidad sectorial basada en análisis estadísticos, (P) aplicada a los controladores de tránsito aéreo, en (C) comparación al parámetro actual, ¿(O) mejora el rendimiento operacional mediante cambios en la distribución de carga laboral?	Sectorización Plan de vuelo Proyección
Modelado Predictivo De La Demanda ATS Para La Optimización Sectorial En CENAMER Basado En Datos 2024-2025.	Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025, utilizando recursos (A) disponibles con la información existente, con la finalidad de (R) disminuir la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementado (T) mediante un piloto el cuarto trimestre de 2026.	¿En el (P) personal ATS, la (I) reducción en un 10% en la utilización de los sectores basada en el análisis de la data histórica, (C) comparada con la distribución actual, (O) genera una disminución significativa en la carga laboral durante el periodo 2026?	Examinar (S) las proyecciones para el periodo 2026 utilizando modelos de series de tiempo (M) evaluando R-cuadrado ajustado y error del pronóstico, con bases de datos (A) aplicables con herramientas analíticas, (R) validando el modelo predictivo para la planificación (T) previo a un piloto para el periodo 2026.	¿La (I) aplicación de modelos de series de tiempo sobre (P) los datos del periodo 2024 al 2025, (C) comparativo a un análisis descriptivo tradicional, permiten (O) identificar patrones de demanda no detectables por métodos convencionales?	Plan de vuelo Millas Proyección

Fuente: Elaboración propia

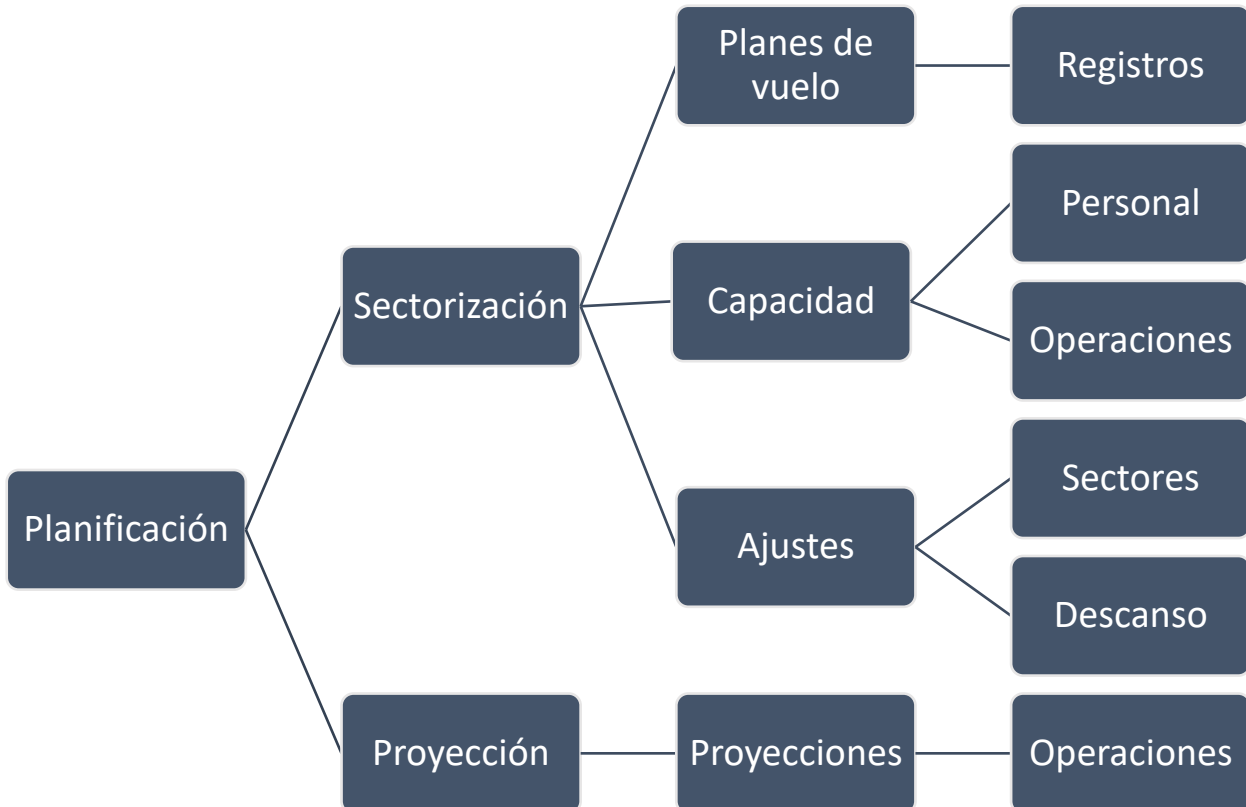
**Tabla 9: Continuación de matriz de congruencia**

Título de la investigación	General		Específico		Variables
	Objetivo	Pregunta	Objetivos	Preguntas	
Modelado Predictivo De La Demanda ATS Para La Optimización Sectorial En CENAMER Basado En Datos 2024-2025.	Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025, utilizando recursos (A) disponibles con la información existente, con la finalidad de (R) disminuir la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementado (T) mediante un piloto el cuarto trimestre de 2026.	¿En el (P) personal ATS, la (I) reducción en un 10% en la utilización de los sectores basada en el análisis de la data histórica, (C) comparada con la distribución actual, (O) genera una disminución significativa en la carga laboral durante el periodo 2026?	Evaluar (S) el impacto del cambio en la sectorización mediante simulaciones y análisis de los KPIs, (M) comparando resultados con el modelo actual, utilizando supuestos de los registros (A) mediante el modelado de datos, para (R) determinar las políticas de la gestión del espacio aéreo para (T) su uso en el cuarto trimestre del 2026.	¿(I) La adopción de políticas operacionales basadas en la optimización y predicción estadística en (P) la planificación para el periodo 2026, (C) comparado con el modelo actual de planificación, ¿(O) mejora la delimitación de parámetros y toma de decisiones?	Sectorización Plan de vuelo Proyección

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2 ESQUEMA DE VARIABLES DE ESTUDIO

Para una mejor comprensión, es necesario estructurar el esquema de las variables y la contextualización de estas en relación con las demás partes del estudio; esto facilitará determinar el valor de los conceptos con relación a la información existente. Se puede representar el esquema de la siguiente manera:



**Ilustración 2: Diagrama de relación de variables**

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Para definir las variables, es necesario comprender la estructura de estas dentro del esquema; la importancia corresponde a la función de los esquemas y la conceptualización como la desagregación de las partes de una variable, para la comprensión clara de las partes que integran cada elemento y las dimensiones. Se puede visualizar de la siguiente manera:

**Tabla 10: Operacionalización de variables**

Variable	Dimensión	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Escala	Instrumento de Medición
Plan de Vuelo	Registros	Inscripción de datos.	Cantidad de gestiones realizadas por CTA.	Numero de registros de las operaciones	Razón	Registro digital de vuelos por sistema ATFM
Capacidad	Personal	Grupo de personas que cumplen funciones generalmente empresariales.	Individuos disponibles para suplir la demanda.	Cantidad de Empleados capacitados para operar.	Razón	Registro de asistencia de personal CENAMER
Millas	Operaciones	Unidad de medición en navegación aérea.	Numero de gestiones programadas o asignadas.	Cantidad de millas registradas	Razón	Registro digital
Sectorización	Sectores	Partes de una colectividad que tienen caracteres peculiares o diferenciados.	Espacio aéreo designado para el control de operaciones según necesidades.	Sectores habilitados según necesidad.	Nominal	Lineamiento de sector según disposiciones CENAMER y cantidad de operaciones
Proyección	Operaciones	Actividades cotidianas involucradas en la gestión de una empresa.	Numero de gestiones programas para periodos futuros.	Predicción de operaciones	Razón	Operaciones proyectadas por modelo generado.

Fuente: Elaboración propia

Variables de control:

Conceptos recolectados para funciones del estudio tienen propósito de contextualizar la data de las variables independientes y dependientes; conceptos como región, sector, compañía o demás información que se pueda considerar como relevante para el estudio son incluidos dentro de esta categoría.

Variable Independiente:

**Plan de vuelo:** Se considera como una variable independiente debido a que no es afectada por otros conceptos; dentro del estudio esta funcionará como nuestra fuente de información de los registros correspondientes a las operaciones realizadas dentro del periodo 2024 a 2025. La medición de esta se dará por medio de la cantidad brindada y se desglosará únicamente en la dimensión de registros.

**Capacidad:** Considerada como independiente ya que las dimensiones de personal y

capacidad de respuesta a las operaciones son influenciadas únicamente por contrataciones, lo cual no representa un concepto dentro de las variables a considerar. Esta variable se considera para el estudio debido a la importancia que tiene en el rendimiento de las empresas y la segmentación de sectores, por lo que su inclusión era uno de los fundamentos de la investigación.

Variables dependientes:

**Sectorización:** La organización de los sectores se considera como una variable dependiente ya que esta se ve afectada tanto por los registros como por la capacidad; las dimensiones de sectores y descansos son situacionales dentro de las operaciones de la institución y el cambio de estas se dará a raíz de ajustes en planes o la disponibilidad de personal para gestionar las operaciones que se den en determinado periodo.

**Proyección:** Las proyecciones consideran únicamente la dimensión de operaciones futuras, concepto el cual se verá afectado por los registros de la base de datos y las tendencias percibidas del periodo 2024 al 2025. Esta variable se toma en consideración ya que el propósito de la investigación tiene como finalidad mejorar los modelos predictivos para tener una mejor planificación respecto a las gestiones y de esta manera controla el desbalance existente en la asignación de sectores al personal.

3.1.4 HIPÓTESIS

**Tabla 11: Tabla de hipótesis de la investigación**

Relación	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa
<u>Millas</u> <u>Sector</u>	H0: No existe diferencias estadísticas entre los diferentes millajes por sector y el error de predicción (RMSE y MAE).	H1: Existe diferencias estadísticas entre los diferentes millajes por sector y el error de predicción (RMSE y MAE).
<u>Nivel de vuelo</u> <u>Sector</u>	H0: No existe diferencias estadísticas entre los diferentes niveles de vuelo por sector y el error de predicción (RMSE y MAE).	H1: Existe diferencias estadísticas entre los diferentes niveles de vuelo por sector y el error de predicción (RMSE y MAE).
<u>Minutos</u> <u>Sector</u>	H0: No existe diferencias estadísticas entre los distintos tiempos de ocupación en el sector y el error de predicción (RMSE y MAE).	H1: Existe diferencias estadísticas entre los distintos tiempos de ocupación en el sector y el error de predicción (RMSE y MAE).

Fuente: Elaboración propia

3.2 ALCANCE

El alcance de la investigación es correlacional – explicativo, debido a que el objetivo de esta es la exploración de la relación existente entre variables, consideraciones sobre posibles causales en variaciones de las operaciones aeronáuticas y explicativos sobre comportamiento,

sectorización y el uso de recursos. Además de buscar relaciones entre variables en la investigación, este tipo de alcance permite explicar cómo estas influyen en el comportamiento de las operaciones en el control de tránsito aéreo.

Para el enfoque correlacional, se determina el nivel de asociación que existe entre las variables tomando en consideración las técnicas estadísticas. En el caso de la parte explicativa, se estudian las relaciones mediante el uso de modelos para establecer asociaciones causales en el control de tránsito aéreo. Esto evidencia la importancia de las relaciones claves para la toma de decisiones. Por esta razón, el alcance establecido, siendo correlacional-explicativo, se ajusta para la presente investigación orientada a predecir y optimizar modelos complejos como lo argumentan Hernández Sampieri y Fernández-Collado (2014).

### **3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

Debido a la naturaleza del análisis de datos históricos sin manipular variables en el sector aeronáutico, el diseño para la investigación es no experimental y de tipo longitudinal. Las observaciones de los acontecimientos en el contexto real hacen que este tipo de diseño sea lógico y congruente con la aplicación de modelos de series de tiempo y de aprendizaje automático para entrenarlos con información de registros acumulados a través del tiempo con el objetivo de identificar patrones y comportamientos en las operaciones de CENAMER.

En la característica longitudinal se estudia el desarrollo y progreso de variables, así como la generación de predicciones con fundamento en la tendencia histórica que permite la planificación estratégica en la gestión del espacio aéreo. Por las razones mencionadas, se considera que el diseño propuesto se ajusta a las investigaciones relacionadas al sector aeronáutico, donde hay prioridad en el uso de datos observacionales para el proceso de construir modelos predictivos como lo ejemplifica Hernández Sampieri & Fernández-Collado (2014).

#### **3.3.1 POBLACIÓN**

Para el estudio se define la población como el flujo continuo e infinito de operaciones aéreas gestionadas por CENAMER, sin restricción temporal. Dicho flujo involucra variables de volumen de tráfico y sectorización en el espacio aéreo, lo que permite describir la dinámica operativa. Debido a la complejidad de analizar un flujo continuo de operaciones, la población no es directamente observable en su totalidad y requiere de una delimitación temporal para su análisis.

### 3.3.2 MUESTRA

En virtud del enfoque adoptado, la investigación utiliza una muestra censal temporal, correspondiente al total de datos disponibles en el aplicativo ATFM que involucra los periodos de 2024 y 2025 que equivalen a 2,817,904 registros operacionales.

El enfoque censal temporal para el análisis de series temporales es indispensable para el estudio de ciclos y tendencias para preservar la información de manera íntegra, sin menoscabo de datos que sean relevantes para los modelos estadísticos y de aprendizaje automático. Por tal efecto, la utilización del conjunto total de datos apoya el proceso explicativo y de estimación de los modelos, lo que es congruente con las buenas prácticas en estudios predictivos y análisis de datos longitudinales como lo establecen Rahim et al. (2018).

El uso de un conjunto amplio de datos es fundamental para investigaciones de series de tiempo para identificar la estacionalidad y tendencias de los acontecimientos en el rubro del control de tránsito aéreo. Por lo tanto, los datos históricos de las operaciones permiten la robustez para la construcción de modelos de predicción y legitimidad de los resultados, lo cual es adecuado utilizar un censo temporal completo como lo argumenta Bryman (2016).

### 3.3.3 TÉCNICA

En concordancia con lo expuesto en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, la presente investigación no considera técnicas de muestreo debido a que se trabajará con una muestra censal temporal. Las técnicas de muestreo no aplican para este caso debido a que podría alterar la estructura temporal de los datos y afectar los patrones en las operaciones de control de tránsito aéreo, así como la estacionalidad y las tendencias. En el análisis de series de tiempo es necesario mantener una continuidad cronológica que permita respaldar la autenticidad de los resultados y modelos predictivos. Por lo tanto, el hecho de no incluir una técnica de muestreo no representa una limitante, sino que es una decisión argumentada para el tipo de análisis temporal y econométrico aducido por Rahim et al. (2018).

### 3.3.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN

**Tabla 12: Tabla de Inclusión y Exclusión**

<b>Inclusión:</b>	<b>Exclusión:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Los datos deberán pertenecer al periodo 2024 - 2025.</li><li>• Los registros deberán estar completos.</li><li>• Todo dato deberá estar en los sectores regionales</li><li>• Los sectores deberán estar dentro de los establecidos oficialmente por CENAMER.</li><li>• Los datos deberán ser naturalmente registrados, no podrá estar sujetos a integraciones forzosas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Los datos son de periodos previos al 2024.</li><li>• Los registros no están completos.</li><li>• Datos que corresponde a sectores externos.</li><li>• Los sectores que no estén establecidos o que se den por casos particulares no reglamentados.</li><li>• La data deberá evitar duplicidad de gestiones.</li><li>• De no ser integrados en la base original correspondiente, la data no podrá considerarse.</li></ul>

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de selección y construcción del conjunto de datos para la presente investigación, se utilizaron criterios de exclusión basados en limitaciones técnicas del entorno de estudio. Se evidenció la limitante de capacidad computacional para el procesamiento de grandes cantidades de datos, lo que restringió el manejo de series históricas de mayor alcance sin exponer la estabilidad y tiempo de funcionamiento de los modelos. Cabe destacar que el cambio de enfoque y temática de investigación significó la reestructuración de las fases metodológicas del documento y conjunto de datos, lo que conlleva a priorizar la coherencia vertical con los nuevos objetivos planteados.

Por consiguiente, se presentaron restricciones en la obtención de datos desde el aplicativo ATFM acerca de las operaciones aéreas ya que el sistema no brinda la posibilidad para la descarga masiva de manera consolidada, dejando como única opción la extracción de frecuencia en lotes mensuales. Por lo tanto, se realizó la delimitación del periodo de análisis para los años 2024 y 2025 con el objetivo de asegurar que los datos sean consistentes, íntegros y factibles para el desarrollo de modelos predictivos, sin menoscabo de la investigación.

### 3.4 TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS APLICADOS

Para la investigación, se propone realizar un análisis del comportamiento de los sectores a lo largo del tiempo mediante datos recolectados por medio del módulo ATFM; con base en la información y el análisis realizado, se proyectarán los resultados con la finalidad de validar las teorías. Se propone el siguiente procedimiento:

- Recolección de información mediante los datos operacionales de CENAMER registrados en el aplicativo ATFM; se deberá procesar la información obtenida para ser utilizada en los modelos pertinentes. Los datos correspondientes a esta información son los siguientes campos:

**Tabla 13: Diccionario de datos**

**Diccionario:**

Concepto	Tipo de dato	Longitud	Descripción
FplMsgld	Texto	0 – 10 caracteres	Código asignado a las gestiones
Flight	Texto	0 – 10 caracteres	Código de vuelo
Register	Texto	1 – 7 caracteres	Registro de la aeronave
Aircraft type	Categoría	1 – 7 caracteres	Clasificación de aeronave
Departure	Texto	1 – 5 caracteres	Ubicación de partida
Destination	Texto	1 – 5 caracteres	Ubicación de llegada
EOBD date	Fecha	YYY-MM-dd	Fecha de partida de la aeronave
FIR entrance datetime	Timestamp	YY-MM-dd Hr: min:sec	Tiempo de entrada de espacio regional
FIR exit datetime	Timestamp	YY-MM-dd Hr: min:sec	Tiempo de salida de espacio regional
Minutes flown	Núm. Continuo	> 0 minutos	Minutos de vuelo
Miles flown	Núm. Continuo	> 0 millas	Distancia de vuelo
Route	Texto	1 – 50 caracteres	Programación de viaje

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14: Continuación de Diccionario de datos**

**Diccionario:**

Fix	Texto	1 – 10 caracteres	Desglose de programación
Sector	Texto	1 – 7 caracteres	Sector utilizado durante periodo
Level	Núm. Continuo	>0 pies de altura	Altura de vuelo
Date Time	Timestamp	YY-MM-dd Hr: min:sec	Registro de sectores de vuelo

Fuente: Elaboración propia

- Aplicación de modelos estadísticos, regresiones, modelos correlativos, proyecciones, series de tiempo y demás pruebas matemáticas que sean consideradas como necesarias para la robustez del ejercicio. Entre estas podemos mencionar pruebas ARIMA o SARIMA, simulaciones y predicciones y demás modelos que se consideren apropiados para justificar la conclusión.

- Representaciones gráficas y comparativas para extraer información y brindar insights pertinentes a los datos a considerar. Es relevante compartir los hallazgos de la investigación, por lo que la necesidad de representarlos de manera comprensible es una de las partes más importantes del procedimiento.

“Los datos deben ser confiables, pertinentes y suficientes para lo cual es necesario definir las fuentes y técnicas adecuadas” (Bernal Torres, 2010, p.191); es viable que la información utilizada sea tratada de manera eficaz y considerando la finalidad del estudio. Para poder extraer data valiosa de la información, será necesario extraer la data, limpiarla, modelarla y analizarla, de esta manera podremos obtener diferentes resultados, los cuales son necesarios para validar las hipótesis y brindar conclusiones.

### **3.5 FUENTES DE INFORMACIÓN**

#### **3.5.1 FUENTES DE INFORMACIÓN PRIMARIA**

La presente investigación no utilizará datos de fuentes primarias ya que no se participó en el proceso directo para la recolección de estos.

#### **3.5.2 FUENTES DE INFORMACIÓN SECUNDARIA**

Debido a que los datos corresponden a registros operacionales de CENAMER, para la investigación se utilizará la fuente de tipo secundario por la justificación expresada en la sección 3.5.1 Fuentes de Información Primaria. La información será proporcionada por la institución, donde se registran datos sobre las operaciones mediante el aplicativo interno de ATFM para realizar las pruebas pertinentes y el estudio de los datos a través del tiempo.

### **3.6 PLAN DE ANÁLISIS DE DATOS**

El procedimiento de análisis de datos es fundamental para un estudio, ya que detalla la secuencia lógica a realizar para obtener resultados. A continuación, se brinda la estructura de la planificación de la siguiente manera reflejada en el plan de análisis:

	DÍAS 1 - 5	DÍAS 6 - 10	DÍAS 11- 15	DÍAS 16- 20	DÍAS 21 - 25	DÍAS 26 - 30	DÍAS 31 - 35	DÍAS 36 - 40	DÍAS 41 - 45
<i>Estructurar investigación e integrar base teórica y metodológica</i>	FASE 1								
<i>Solicitar información a utilizar y detallar el uso de esta a las fuentes</i>			FASE 1						
<i>Recepción y validación de documentos solicitados</i>			FASE 2						
<i>Organización y limpieza de datos; exportar documentos a la herramienta estadística</i>					FASE 2				
<i>Realizar EDA y representar de manera gráfica los resultados</i>					FASE 2				
<i>Integración de información y creación de Script de los modelos pertinentes</i>						FASE 3			
<i>Realizar pruebas del funcionamiento del modelo y tomar notas de posibles ajustes</i>								FASE 3	
<i>Ajustar modelo según las correcciones y con la finalidad de optimizarlo</i>								FASE 3	
<i>Registrar, representar e interpretar los resultados de manera que el personal no técnico pueda utilizarlo</i>									FASE 3

**Ilustración 3: Diagrama de Gantt para el Plan de Análisis de los Datos**

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El desarrollo del presente capítulo integra la adquisición, análisis e interpretación de los datos; la recolección de información operacional en CENAMER de los periodos anuales de 2024 y 2025 (donde se utilizaron 2,817,904 registros) fundamenta el procesamiento y análisis de los datos (EDA) para la generación de insights. El registro operacional corresponde a los planes de vuelo (FPL), los cuales, al ser recibidos, se integran a la secuencia del aplicativo ATFM.

El capítulo no solo expondrá las métricas obtenidas mediante el análisis, sino que presentará el proceso metodológico para la inferencia predictiva obtenida del procesamiento de datos brutos. La finalidad de la secuencia analítica implementada es aislar el ruido estocástico referente a valores exógenos para el modelamiento de la demanda aeronáutica, permitiendo contrastar los modelos paramétricos de las series temporales con algoritmos no lineales de Machine Learning para la triangulación de hallazgos relativos a las reglamentaciones internacionales o directrices establecidas. Para realizar lo propuesto, el capítulo se estructura de la siguiente manera:

- La sección 4.1 es compuesta por el Análisis Exploratorio de los Datos (EDA), proceso el cual tiene la función de detallar las características del conjunto de datos correspondientes a las operaciones de vuelo representadas por los FPL. Dentro de esta sección se describe el proceso de limpieza, tratamiento y visualización de la información para una interpretación inicial realizada por medio de la codificación de parámetros en la herramienta Google Colab.
- La sección 4.2 contempla secciones que detallan el proceso de recolección de datos y las etapas previas correspondientes a las gestiones realizadas para su obtención. Dentro de esta sección se utilizan herramientas como cronogramas, aplicativos, diccionarios y demás; estos tienen la finalidad de adquirir, estructurar y preparar la información para su posterior uso.
- La sección 4.3 está formada por la presentación de resultados e interpretación por medio de técnicas aplicadas donde se ilustran los resultados pertinentes para poder resumir los hallazgos e inferir la relación existente con aspectos cualitativos exógenos. Esta sección presenta la información inferencial, que permitirá expandir las aplicaciones mediante la integración de los insights en diferentes ámbitos.
- La sección 4.4 del estudio está constatada por el análisis del desarrollo de la

investigación y la integración de los modelos implementados para realizar las predicciones. Dentro del capítulo se explican los parámetros, resultados e inferencias realizadas mediante la interpretación y la justificación de decisiones al momento de implementar pruebas relacionadas a las variables o los modelos seleccionados.

- La sección 4.5 está integrada por la síntesis de los hallazgos investigativos; esto quiere decir que contempla un resumen de los factores más relevantes para el estudio y el justificante de las consideraciones a tomar para la implementación o interpretación de este. Este capítulo muestra la conclusión del análisis y resultados de la investigación, por lo que concretará las partes que dan paso al cierre del estudio.

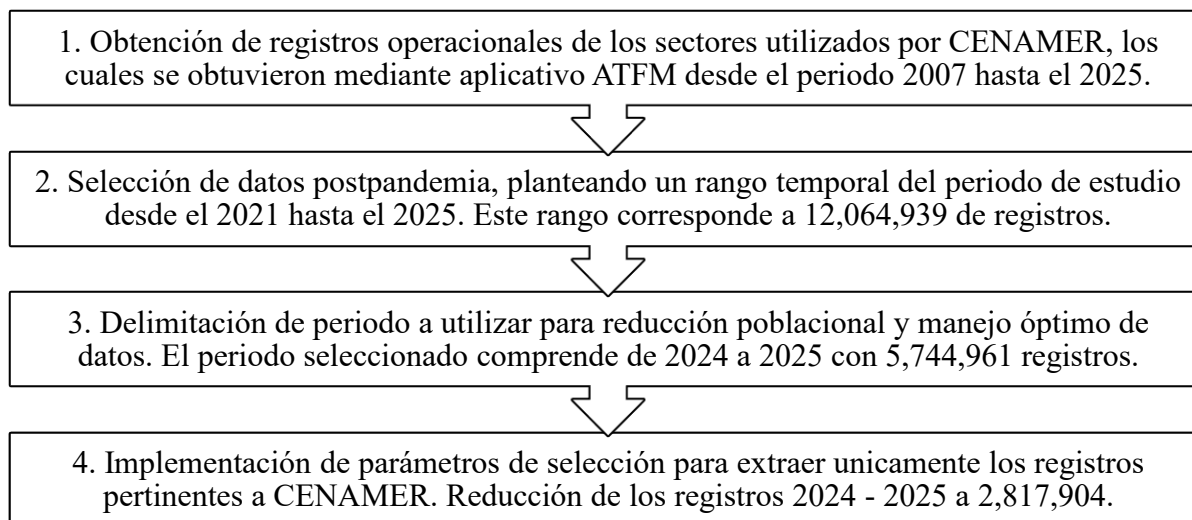
## **4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS**

### **4.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CONJUNTO DE DATOS (EDA)**

El estudio utiliza una muestra censal temporal de 2,817,904 registros operacionales, lo que representa las gestiones realizadas por CENAMER dentro del área aérea controlada durante los periodos 2024 y 2025. Se plantea el uso de una muestra censal temporal en su totalidad dado que se tiene conocimiento de que es finita y se dispone de acceso a la data necesaria; considerando el uso de los datos y la facilidad de manejo, se estima apropiado el uso de los registros en su totalidad para proveer un mayor grado de seguridad y permite el acceso a información necesaria para el estudio (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

Se hace mención de que al utilizar modelos predictivos mediante la técnica de series de tiempo, es de suma importancia el uso de la data en su totalidad para la identificación de patrones y el análisis de las representaciones; de igual manera, utilizar la data en su totalidad evita cercenar información valiosa para la interpretación de los datos (Creswell, 2014). Al detallar las variables temporales se puede denotar la existencia de continuidad perfecta en el periodo utilizado, por lo que se considera que el manejo de datos puede realizarse con diferentes niveles de granularidad, donde los niveles óptimos corresponden a las horas debido a su uso dentro de la industria y los días debido a la estacionalidad de los patrones anuales.

Los datos de esta investigación utilizaron un método de poda para poder llegar al valor actual, proceso el cual se detalla de la siguiente manera:



#### **Ilustración 4. Proceso de depuración para muestra censal temporal**

Fuente: Elaboración propia mediante técnica de podado para muestra censal temporal

Para mejorar la comprensión de las variables, es necesaria la limpieza e interpretación de dichos datos, considerando que la estructura en bruto puede dificultar el uso efectivo de estos. Una vez se obtengan los datos a utilizar, se deberá realizar, como primer paso, el análisis exploratorio de estos; el análisis contextualiza el tipo de variable, valores correspondientes y la función de estos que se observará durante el estudio.

La integración de la matriz de datos brutos al aplicativo (en este caso se utilizará Google Colab, con base en lenguaje Python) se hará con el propósito de realizar un análisis descriptivo de las variables, por lo que se utilizará el comando `All_stats` para desplegar el cuadro correspondiente al detalle de los datos y el tipo de variable.

La matriz de datos brutos presenta consideraciones sobre la decisión de la eliminación de las variables que no presentasen valor para la interpretación de datos y que representarían únicamente consumo de recursos analíticos y de modelado; basado en esta perspectiva, se considera apropiado la eliminación de las columnas que no tengan relevancia para el estudio, esto con la finalidad de evitar interferencias en el análisis y el uso de datos relevantes según los principios de investigación (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). La estructura de los datos en esta etapa corresponde al siguiente detalle:

**Tabla 15. Descriptivo de tipo de variable a utilizar post depuración**

Descriptivo de datos utilizados		
#	Column	Data type
0	FplMsgId	Object
1	Flight	Object
2	Register	Object
3	Aircraft type	Object
4	Departure	Object
5	Destination	Object
6	EOD date	Datetime64
7	Fir entrance datetime	Datetime64
8	Fir exit datetime	Datetime64
9	Minutes flown	Float64
10	Miles flown	Float64
11	Sector	Object
12	Level	Int64
13	Datetime	Datetime64

Fuente: Elaboración propia mediante comando all\_stats en aplicativo Google Colab

**Tabla 16. Estadísticos descriptivos de variables numéricas**

	Minutes flown	Miles flown	Level
Mínimo	0	0	0
Máximo	1,456.58	2,851.64	650
Media	64.35	473.66	325.39
Mediana (Q2)	63.9	477.86	350
Moda	80.1	414.14	350
Frecuencia Moda	1,221	7,321	339,855
Cuartil 25% (Q1)	37.75	274	296
Cuartil 75% (Q3)	82.85	617.44	370
Asimetría	1.33	0.63	-1.04
Curtosis	16.89	0.91	0.45
Conteo	2,817,904	2,817,904	2,817,904
Suma	181,345,700	1,334,731,000	916,919,400
Desviación Estándar	33.31	248.43	66.27
Varianza	1,109.53	61,717.94	4,391.34

Fuente: Elaboración propia mediante comando stats en aplicativo Google Colab

En la tabla ilustrada, se observan los estadísticos correspondientes a los datos cualitativos y cuantitativos de la investigación; se hace mención de que los estadísticos cuantitativos presentan la mayor cantidad de información respecto a sus estadísticos. Las variables cualitativas, por otro lado, presentan únicamente conteo de registros, valores únicos, moda y la frecuencia correspondiente. Interpretando los datos estadísticos, se hacen las siguientes observaciones:

- Los minutos presentan una media de 64.35 minutos, indicando mayor incidencia en viajes de corta duración; sin embargo, se observa que el conjunto posee un máximo de 1,456.58 minutos, significando que a pesar de que la mayoría de los viajes tienen una duración corta, existen considerables instancias en los extremos de la curva. Es relevante mencionar cómo estos valores son afectados por la sectorización establecida por las áreas de viajes; mientras que los viajes cortos se agrupan sobre territorio continental, los viajes en el extremo derecho de la distribución corresponden a rutas oceánicas.

La dispersión del conjunto es elevada, presentando una desviación de 33.31 y varianza de 1,109.53, lo que indica la considerable variabilidad entre vuelos; se detalla que la concentración de datos no se centra en la media, presentando mayor incidencia en valores menores pero afectados de manera significativa por el extremo derecho de los datos. Con un Skewness de 1.33, esto indica una marcada asimetría positiva, integrando a este modelo una cola larga a la derecha representativa de la disminución de los vuelos de larga duración. La curtosis de 16.89 representa distribución leptocúrtica extrema, lo que indica una cola pesada para el conjunto de datos y denota de esta manera la violación de los principios de normalidad.

Los valores de cero correspondientes a los minutos tienen explicación en un registro mínimo temporal, valor el cual es registrado como cero según el sistema ATFM; Se sustenta la medida de estos valores mediante el principio empírico aplicado por los controladores de vuelo, el cual estima que “un minuto equivale a aproximadamente 8 millas”, por lo que los registros con valor mínimo corresponden a gestiones que recorren distancias menores que el de una milla, registrando de esta manera números de muy bajo valor.

- Las millas voladas presentan una media de 473.66 millas y un máximo de 2,851.64 millas, indicando que existe una dispersión de datos de menor grado de severidad en comparación con la variable de minutos. Considerando la relación directa entre tiempo y distancia, el millaje de los vuelos se ve afectado por la ruta utilizada; la implicación directa de esto con relación al tiempo corresponde a una distribución similar, pero a menor escala que la de minutos y en comparación con su contraparte temporal, la distancia presenta valores promedio elevados, pero no extremos.

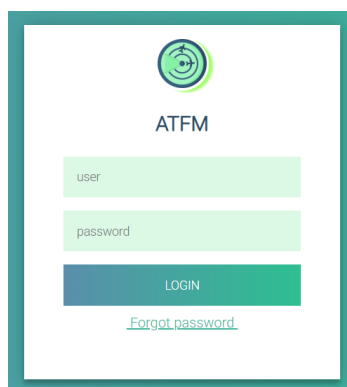
Con una desviación de 248.43 y una varianza de 61,717.94, los datos del conjunto presentan una dispersión elevada, la cual se justifica debido a la diferencia de distancias por sector utilizado. Con un Skewness de 0.63, la distribución se considera moderadamente positiva, indicando un

acercamiento a la normalidad de los datos. La curtosis del conjunto es de 0.91, indica una distribución ligeramente leptocúrtica respecto a la curva; en relación con la distribución general, se observa un patrón relativamente estable en cuanto a la dispersión de los datos. Al ser leptocúrtica, la distribución presenta datos en los extremos, pero a diferencia de los minutos, estas colas no son largas.

- El nivel de vuelo presenta una media de F325.39 y un máximo de F650.00, indicando que, a diferencia de las otras dos variables, los datos centrales se concentran cerca de la media; estas métricas se justifican debido a la capacidad de vuelo y rango según el tipo de aeronave. Comparativa a las variables numéricas, los datos del conjunto presentan mayor consistencia debido a una menor dispersión en la distribución; con una desviación de 66.27 y varianza de 4,391.34, las operaciones se concentran en un claro rango de vuelo para la distribución.

La asimetría para el nivel de vuelos es de -1.04, indicando un marcado sesgo a la izquierda, lo que indica que la mayor parte de los datos se encuentran por sobre la media, siendo afectados por la cola de valores menores. La curtosis es de 0.45, implicando una aproximación a 0 y una dispersión ligera de los valores, presentando de esta manera una distribución más pareja y colas no extremos largos

#### 4.1.2 LIMPIEZA Y PREPARACIÓN DE LOS DATOS



#### **Ilustración 5. API - Air Traffic Flow Management**

Fuente: Imagen proporcionada por la coordinación de ATFM

La recolección y carga de datos se realizaron mediante la extracción inicial de la información al utilizar la API de ATFM (Air Traffic Flow Management). Como primera instancia, se realiza la extracción de las operaciones con relación a los planes de vuelo ingresados en el ATFM

correspondientes a los periodos 2024 y 2025. El aplicativo permite realizar la extracción en base a frecuencias mensuales, por lo que se realizaron un total de 24 extracciones como etapa inicial del proceso de recolección de datos.

La estructura inicial de la base de datos corresponde a 19 columnas seccionadas en tres tipos de variables. El detalle de esta base inicial corresponde al siguiente listado:

- String: Consta de registros como FplMsgld, Flight, Register, Aircraft type, Departure, Destination, Route, Fix y Sector. Entre estos datos encontramos categóricos o nominales.
- Numéricas: Consta de registros Minutes flown, miles flown, Level, Latitude y Longitude. Estos datos describen medidas operacionales.
- Date / Time: Consta de registros como EOBD date, Fir entrance, Fir exit y Date time. Estas variables denotan un periodo en el que se realizó una gestión.

Una vez detallada la estructura de las variables, es necesario identificar aquellas que brinden información relevante para el estudio, por lo que al identificar conceptos que no representan valor para el estudio se tomó la decisión de eliminarlos. Al carecer de utilidad, se presenta un proceso de depuración para tomar una decisión sobre el uso de recursos respecto al procesamiento y el entrenamiento de los modelos futuros. A raíz de esto, se consideró apropiado remover estos conceptos mediante el comando “Drop” de Python con la finalidad de mejorar el procesamiento de datos y validar la utilidad de los restantes. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

**Tabla 17. Muestra representativa de matriz del estudio**

	FplMsgId	Flight	Register	Aircraft type	Departure	Destination	EOBD date	Fir entrance datetime	Fir exit datetime	Minutes flown	Miles Flown	Sector	Level	Datetime
0	9277617	CMP123	HP1728	B738	MMUN	MPTO	24/5/2012	24/5/2012 16:56:57	24/5/2012 17:49:52	52.92	404.146	C3NW	280	24/5/2012 16:57:10
1	9349696	LPE2457	CCBAF	A320	MMUN	SPJC	24/6/2006	24/6/2006 06:24:50	24/6/2006 07:16:33	51.72	402.931	C3NW	253	24/6/2006 06:24:50
2	9044324	CMP476	HP1718	B738	MPTO	KDEN	24/2/2026	24/2/2026 20:01:36	24/2/2026 21:00:15	58.65	415.098	C3NW	340	24/2/2026 20:59:47
3	9725742	CMP347	HP1855	B738	MMUN	MPTO	24/10/2016	24/10/2016 21:59:58	24/10/2016 23:16:29	76.52	569.663	C3NW	370	24/10/2016 22:27:15
4	9526352	AAL1353	N903AN	B738	KMIA	MROC	24/8/2003	24/8/2003 01:18:31	24/8/2003 02:39:11	80.67	578.493	CENW	350	24/8/2003 01:38:12

Fuente: Elaboración propia mediante librerías de arrays en Google Colab

\*Nota sobre la tabla: Debido a la extensión de la matriz (la cual corresponde a casi tres millones de filas), se representa de manera significativa la estructura utilizada para datos mediante la Tabla 19.

**Tabla 18. Descriptivo de valores faltantes**

FplMsgId	Flight	Register	Aircraft type	Departure	Destination	EOBD date	Fir entrance datetime	Fir exit datetime	Minutes flown	Miles Flown	Sector	Level	Datetime
0	0	111,117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia mediante comando de conteo en Google Colab

Una vez realizada la depuración de variables y obteniendo la matriz a utilizar, mediante el comando Display, se solicita el detalle de faltantes existentes por variable para tener conocimiento de estos; al utilizar el comando, se identificaron 111,117 datos faltantes correspondientes a “Register”, lo cual se atribuye a que vuelos privados y generales pueden presentar su documentación únicamente con la identificación del registro, sin necesidad de un distintivo de llamada.

En consideración a los lineamientos, se da la facultad de que vuelos rutinarios y personales realicen sus operaciones sin un “register” (OACI, 2016); sin embargo, se considera que utilizar métodos de imputación para relleno o sustitución puede ser perjudicial para los modelos; la imputación de datos para la limpieza de los datos tiene como finalidad evitar cercenar información que puede ser necesaria para un estudio completo. Al considerar esto, se decidió imputar los datos con la glosa “no\_register”, lo que evitará la contaminación sintética dentro de los modelos (Revila Novella, 2013).

Una vez realizada la imputación y habiendo realizado el análisis de las estadísticas descriptivas, se utiliza el z score para determinar la existencia de valores atípicos y un detalle de estos; para este estudio, a raíz de la existencia de valores atípicos, se deberá decidir sobre el manejo de estos. Típicamente los investigadores removerían estos valores; sin embargo, se ha considerado que para la investigación sería perjudicial la eliminación de estos, justificando esta decisión en la relación existente de los outliers y la carga de los controladores aéreos, por lo que se considera necesario para poder tener una perspectiva apropiada de las asignaciones. (Karch, 2023)

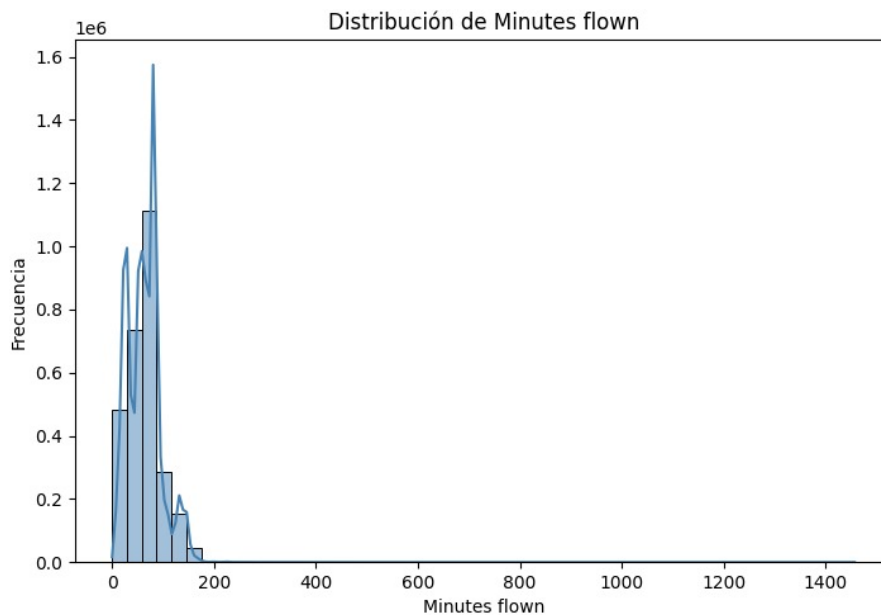
Se hace mención que a pesar de que el porcentual de incidencia correspondiente a los outliers tiene métricas de 00.29% para minutos, 00.11% para millas y 00.49% para el nivel de vuelo (lo cual se considera mínimo), la existencia de estos dentro del modelo es indispensable; a consecuencia de la existencia de estos valores, el efecto que ejercen en la data puede ser identificado, por lo que la eliminación de estos no es justificada. Se detalla que los outliers representan operaciones de “estrés” para el personal, por lo que la eliminación de estas presentaría un sesgo artificial en la información.

Posterior a la limpieza se deberán preparar los datos para la integración a los modelos predictivos; será necesario regularizar los datos, realizar pruebas de estacionalidad, el uso de escalas y demás herramientas de modelado para poder integrar la información de la matriz para las

elaboración de modelos basados en regresiones o Machine Learning; se tomarán en consideración los modelos que presenten características para la reducción de inflación de valores, realizando conteo de operaciones diarias para las predicciones futuras y demás métodos que reduzcan la problemática de la correlación existente entre variables, aun cuando existe una diferencia estadísticamente significativa. (Mogotocoro, 2024)

#### 4.1.3 VISUALIZACIÓN DE DATOS

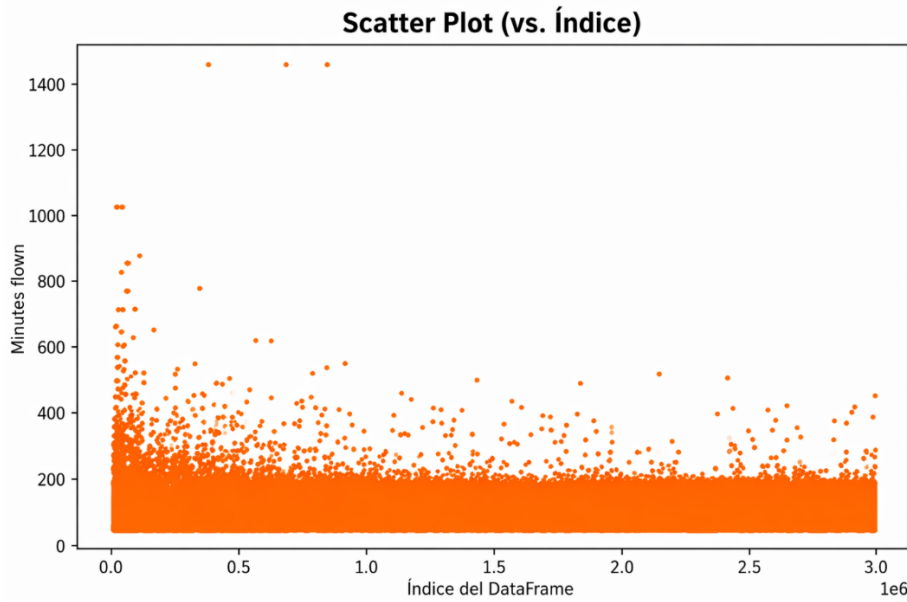
El histograma correspondiente a los minutos presenta una marcada asimetría positiva, concentrando la mayor parte de los datos entre 30 a 80 minutos (representando esto el tercer cuartil del conjunto); el gráfico ilustra una cola larga al extremo derecho, que corresponde a los outliers previamente mencionados (representando los vuelos de larga duración por el uso de los sectores oceánicos), afectando la normalidad del conjunto debido a los extremos integrados, los cuales si bien representan un porcentual minúsculo, al no poder ser eliminados presentan la incógnita.



#### Ilustración 6. Sesgo y cola de minutos

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

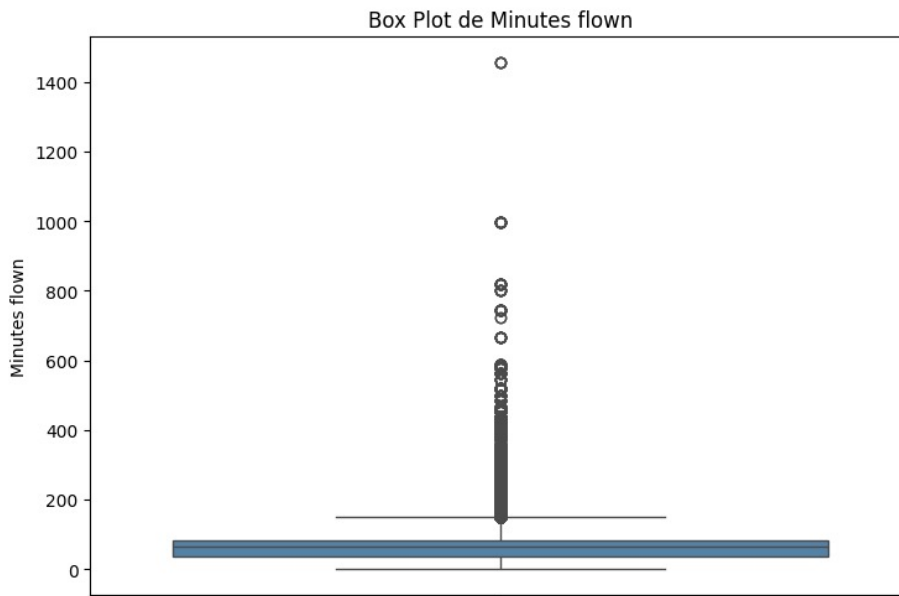
La dispersión muestra mayor incidencia por debajo de los 200 minutos, valores los cuales tienen una relación con la ubicación de los vuelos a los que pertenecen; los vuelos integrantes de los atípicos pertenecen a aquellos que hacen uso de los sectores oceánicos, los cuales se caracterizan por la extensión de la trayectoria utilizada y a consecuencia de un aumento proporcional.



### Ilustración 7. Dispersión de minutos

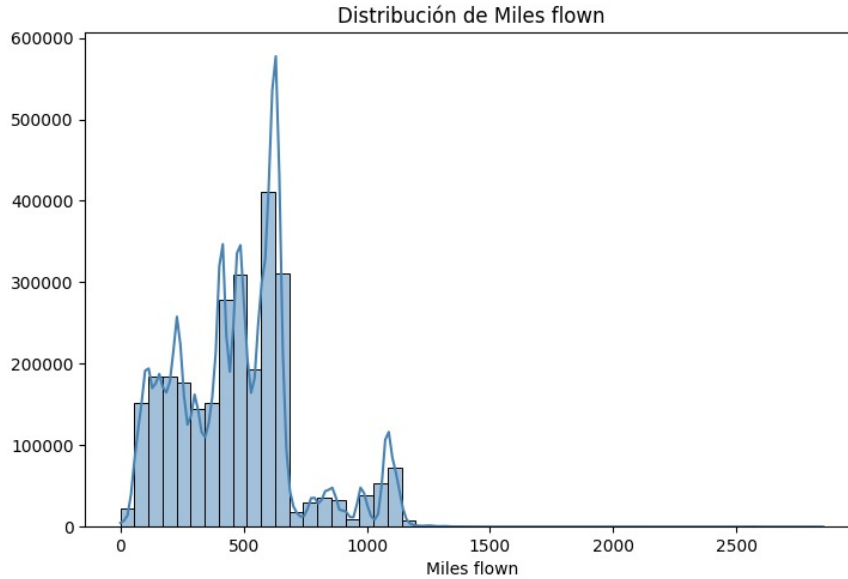
Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

El gráfico de caja y bigotes presenta datos centrados cerca de la media, los cuales se ubican en el rango bajo; la extensión del bigote superior indica valores atípicos marcados, los cuales se asocian con picos generados por la sectorización. Este gráfico denota una alta variabilidad respecto a la duración de los vuelos y la estructura de estos respecto a la cercanía de los datos.



### Ilustración 8. Caja y bigotes de minutos

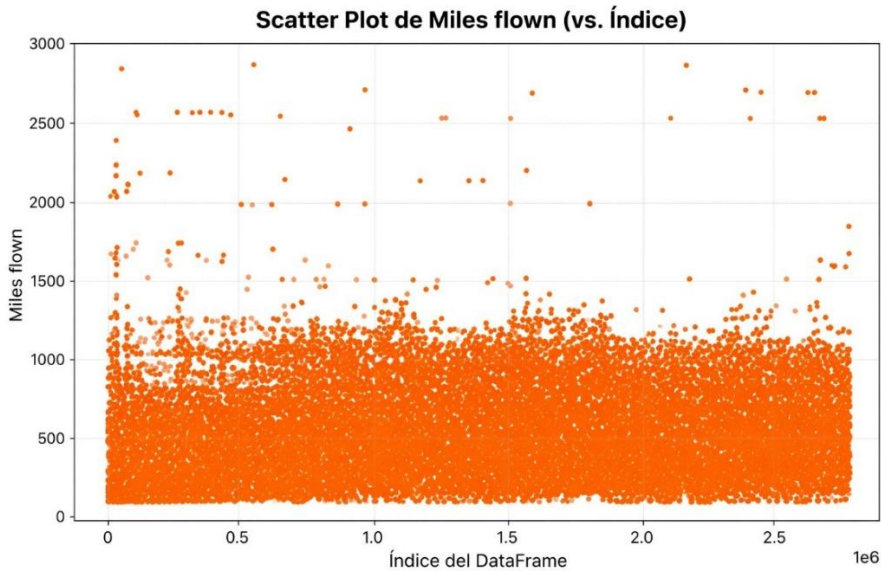
Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)



**Ilustración 9. Sesgo y cola de millas**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

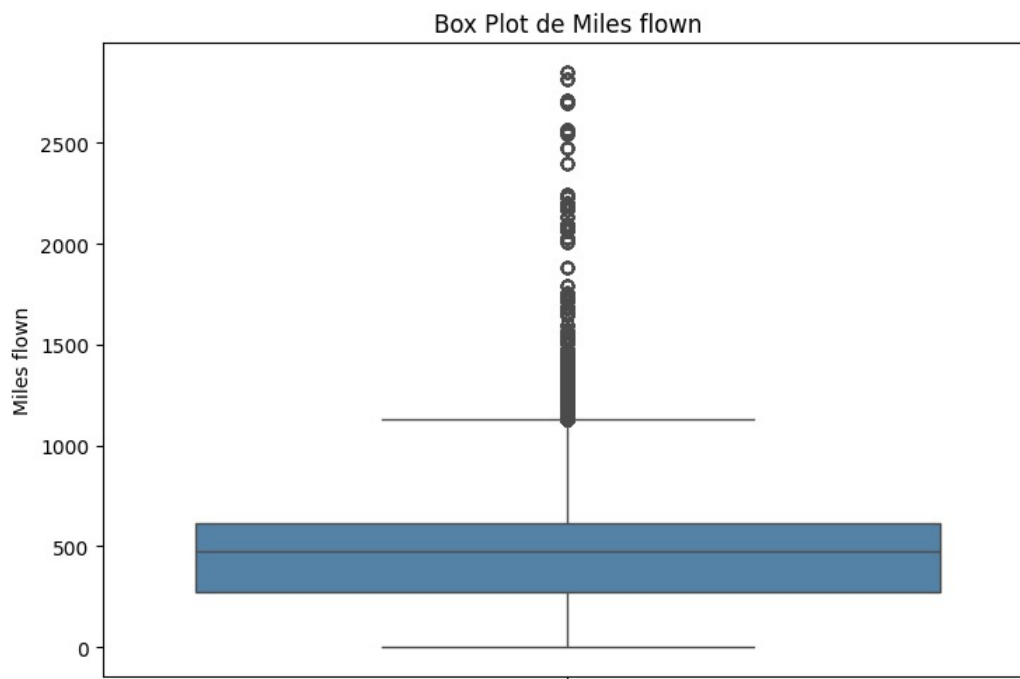
La ilustración 9 corresponde al histograma generado de las millas, el cual presenta una tendencia asimétrico-positiva de grado moderado y concentración entre las 300 y 600 millas; a diferencia de los minutos, presenta una menor distorsión de valores a los extremos, lo cual se justifica debido a la relación existente entre tiempo – velocidad (implica que la misma distancia se puede viajar con diferentes tiempos proporcional a la velocidad de la aeronave).



**Ilustración 10. Dispersión de millas**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

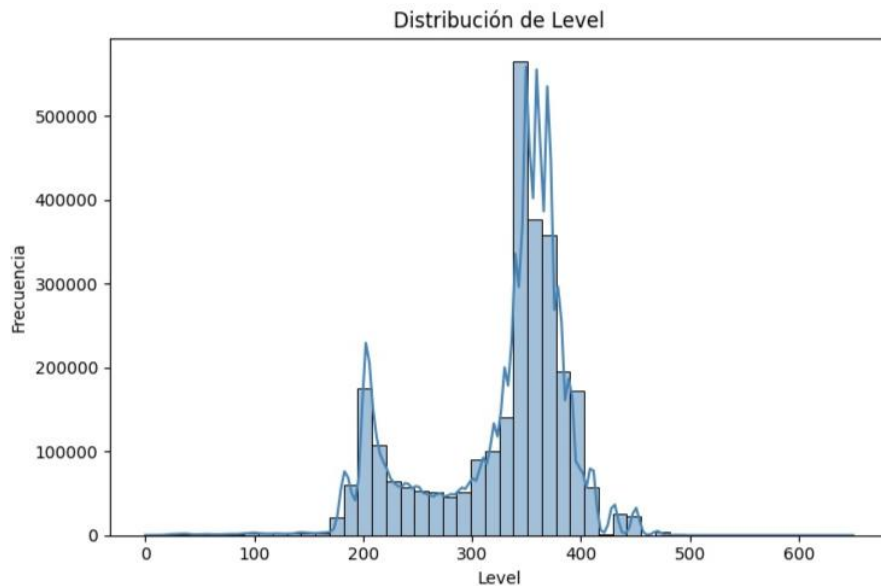
Debido a la existencia de un menor grado de variabilidad y considerando que esta variable es de carácter más estático, se infiere que la estabilidad de esta es mejor que la de minutos. Esta estructura es proporcional a la curtosis de menor grado observada en el análisis de estadísticos descriptivos. Considerando el uso de rutas intracontinentales y del Pacífico, una dispersión más concentrada infiere una variable menos flexible, por lo que la dispersión ilustra una relación sólida entre sectores y distancia (ya que la distancia no cambiará y la mayoría de los viajes se realiza en zonas con menor distancia que los valores atípicos).



### Ilustración 11. Caja y bigotes de millas

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

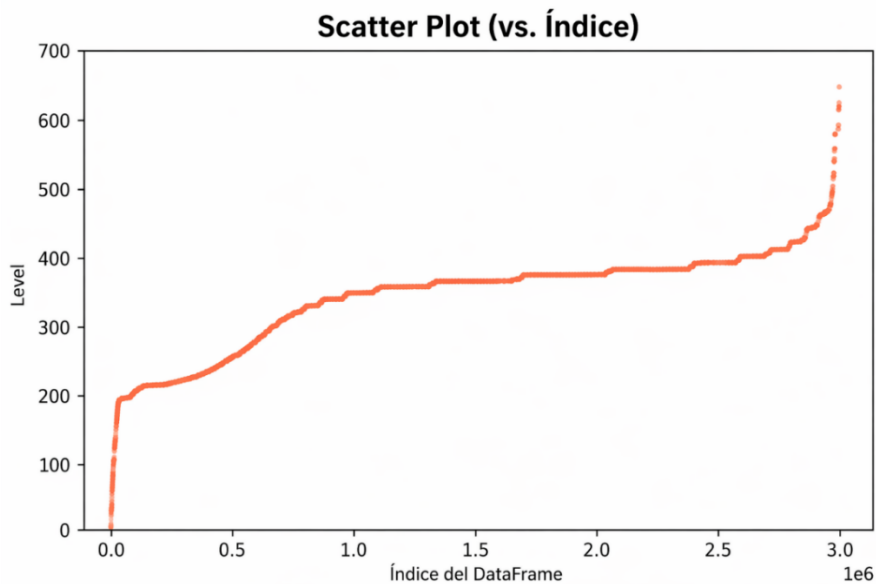
El gráfico de caja y bigotes presenta una estructura más estable con relación al de minutos, esto se evidencia en una cola de menor proporción en la comparativa; este gráfico indica una agrupación de los datos con menor dispersión de la media e ilustra una menor cantidad de valores atípicos. La variabilidad de los valores, a diferencia de la existente en la variable de minutos, es más controlada, por lo que la estructura de la distribución, a pesar de poseer cola larga, no es tan perjudicial como la correspondiente a los minutos, por lo que la variabilidad de estos valores se puede considerar como de menor impacto o más controlada.



### Ilustración 12. Sesgo y cola de nivel de vuelo

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

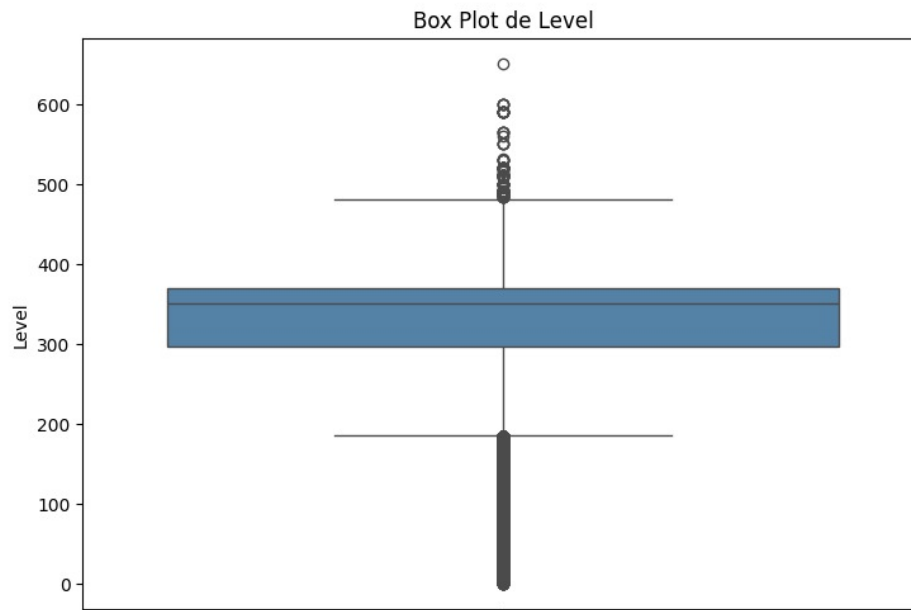
Contrario a las variables de minutos y millas, el histograma correspondiente al nivel de vuelo ilustra una asimetría negativa, demostrando colas en ambos extremos de los niveles y enfocando sus atípicos en los niveles inferiores; este conjunto tiene picos de incidencia pronunciados entre F300 y F360 (valores típicos debido a las prácticas de vuelo para operaciones aéreas).



### Ilustración 13. Dispersión de nivel de vuelo

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

A diferencia de las variables previas, la dispersión del nivel de vuelo tiene una estructura con mayor control y muestra una curva progresiva de valores. El gráfico de caja y bigotes de niveles de vuelo es más compacto y presenta datos centrados alrededor de F350; es importante notar, que, a diferencia de las otras de minutos y millas, el nivel de vuelo presenta una curva donde los valores en ambos extremos existen; esta, a pesar de estar estructurada similar a una distribución normal, es la distribución menos variante y esto se debe a que como tal, el valor de la altitud es independiente o no tiene una relación tan directa como minutos y millas. Se menciona que la dispersión de valores para esta variable es de bajo nivel.

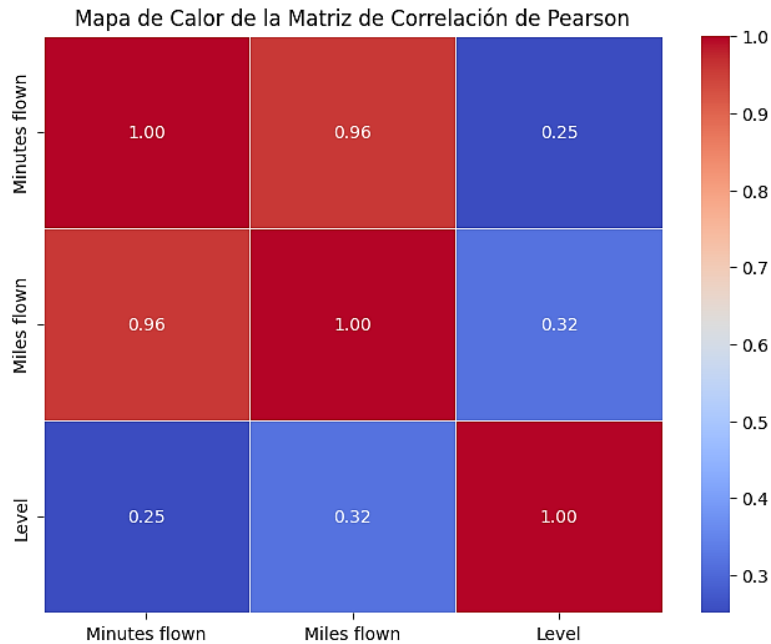


**Ilustración 14. Caja y bigotes de nivel de vuelo**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

#### Análisis univariado y correlación:

Similar a la data exploratoria de los gráficos, el análisis univariado numérico presenta la distribución de los datos según la incidencia de estos; la frecuencia de estos se estructura considerando que los datos de la variable de minutos presentan mayor variabilidad con relación a las demás variables, lo cual influye significativamente en la curtosis de los datos. Respecto a las millas, se observa una relación casi perfecta a los minutos debido al coeficiente de correlación existente. El nivel de vuelo, por otro lado, presenta una menor dependencia ante las otras variables; esto se debe a su función como un parámetro diferente de las operaciones; si bien es un concepto independiente, existe una relación leve entre esta y los demás conceptos.



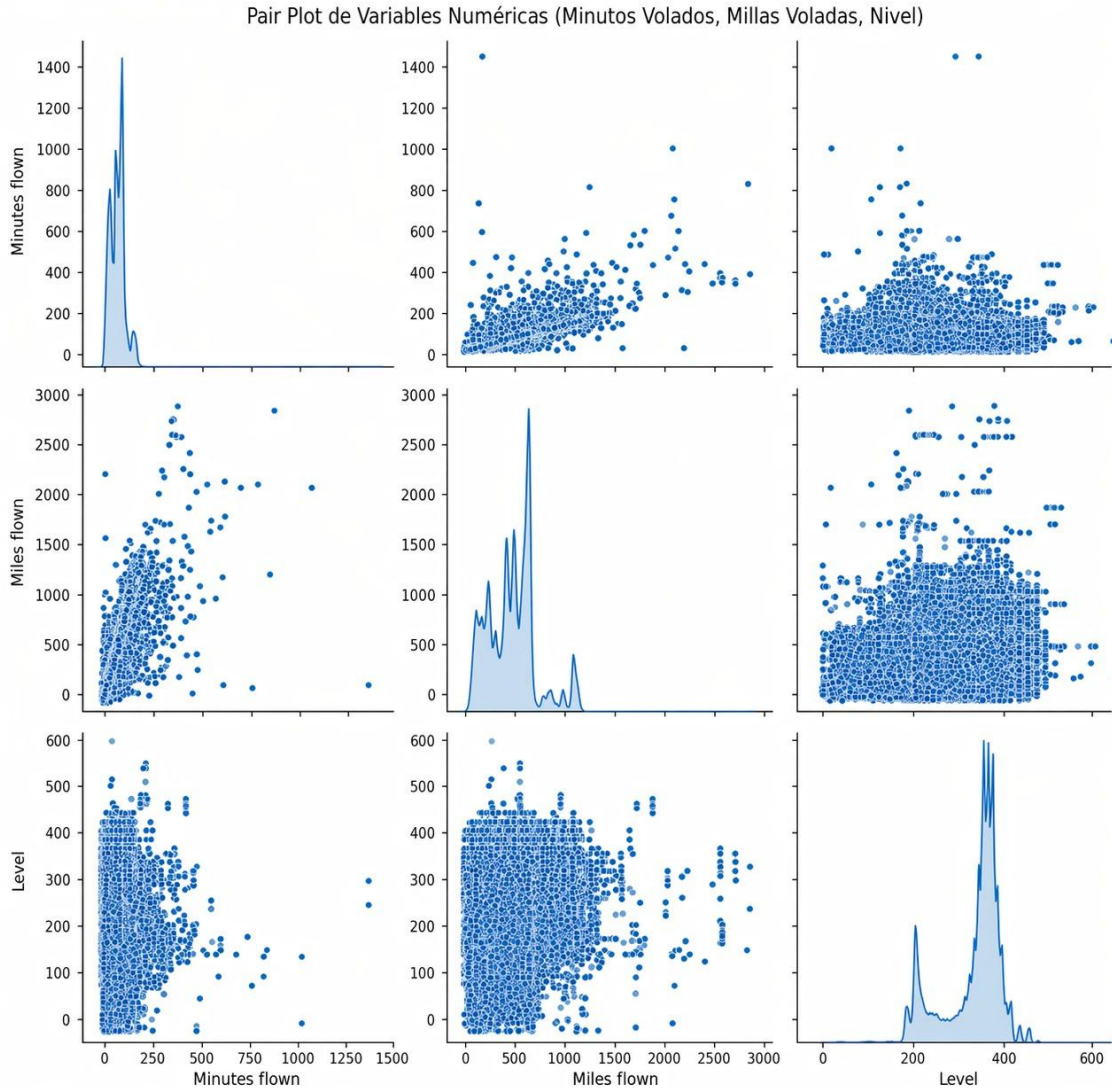
### Ilustración 15. Mapa de calor de correlaciones entre variables numéricas

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

#### Análisis Bivariado:

Examinando el análisis bivariado correspondiente a la data numérica, se observa una marcada correlación entre millas y minutos, lo cual indica proporcionalidad entre la información correspondiente a estas variables; considerando la similitud entre estas, en un modelo de variable única se puede eliminar uno de estos conceptos para evitar multicolinealidad dependiente del modelo. Al analizar la variable nivel de vuelo, la leve relación existente respecto a otras variables presenta consideraciones sobre la integración de esta al modelado; de alterarse, se podría convertir dicha variable en un concepto categórico debido a la complejidad de las interacciones presentadas con otras variables. Es importante mencionar que esta variable tiene una relación directa de menor grado debido a su función dentro de regulaciones, objetivos y tipo de nave.

Se observan patrones que indican la necesidad de modelar los valores para el manejo de la asimetría entre las variables de minutos y millas; debido a la alta relación existente entre estas y el sesgo presentado por las representaciones, los conjuntos requieren considerar la influencia de diferentes factores en cuanto a su manejo ante las variables para el uso de estas en predicciones futuras o pruebas específicas.



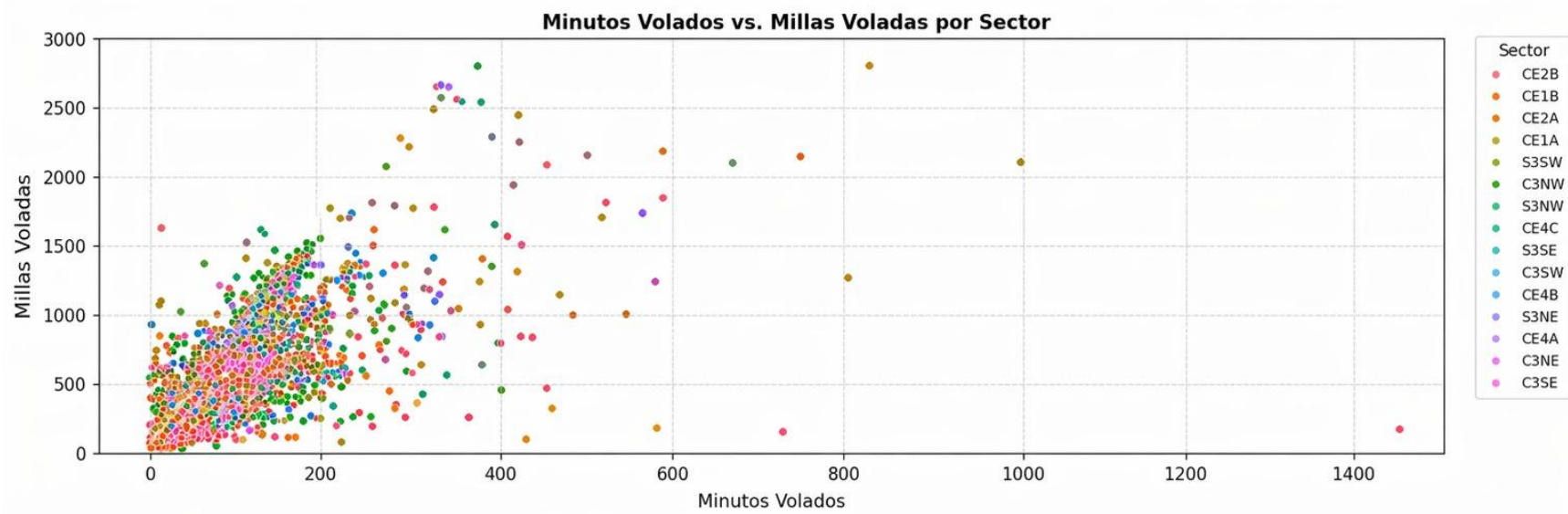
**Ilustración 16. Análisis bivariado numérico**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

Análisis Multivariado:

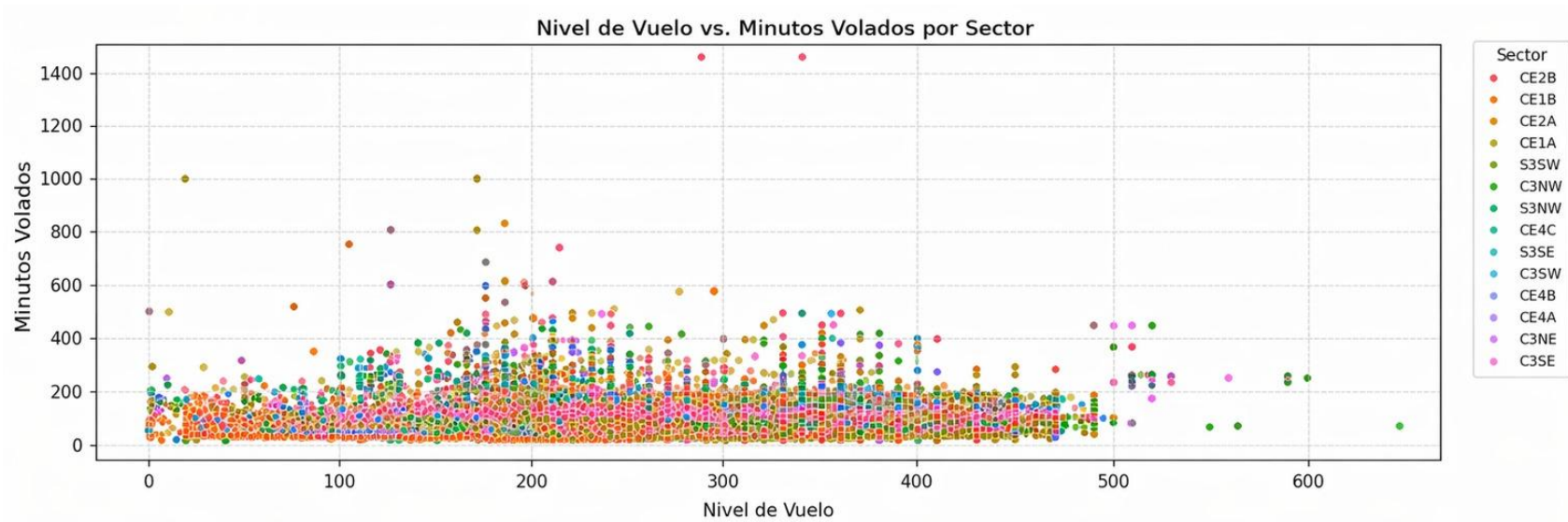
El análisis multivariado de las variables numéricas presenta patrones a considerar dentro de las diferentes categorías presentadas; dentro de estas consideraciones principalmente se analiza la incidencia existente para las agrupaciones como destino, tipo de aeronave, lugar de partida o sector. En las situaciones presentadas, debido a la diferencia entre valores según el grupo de variable, se considera pertinente implementar diferentes pruebas de grupos múltiples para confirmar la significancia de estas.

Al analizar la dispersión de las variables se observa la tendencia existente de que la mayoría de las aeronaves operan dentro de parámetros regulados y ligados directo a las buenas prácticas; esto da explicación a la tendencia leptocúrtica de los valores. Se debe tomar en cuenta que el origen y destino de los vuelos tienen un marcado impacto, debido a que dentro de la región se puede tener un promedio estable, pero al considerar vuelos sobre el Pacífico, es donde observamos la considerable dispersión de los datos respecto a sus colas.



**Ilustración 17. Multivariado de minutos y millas por sector**

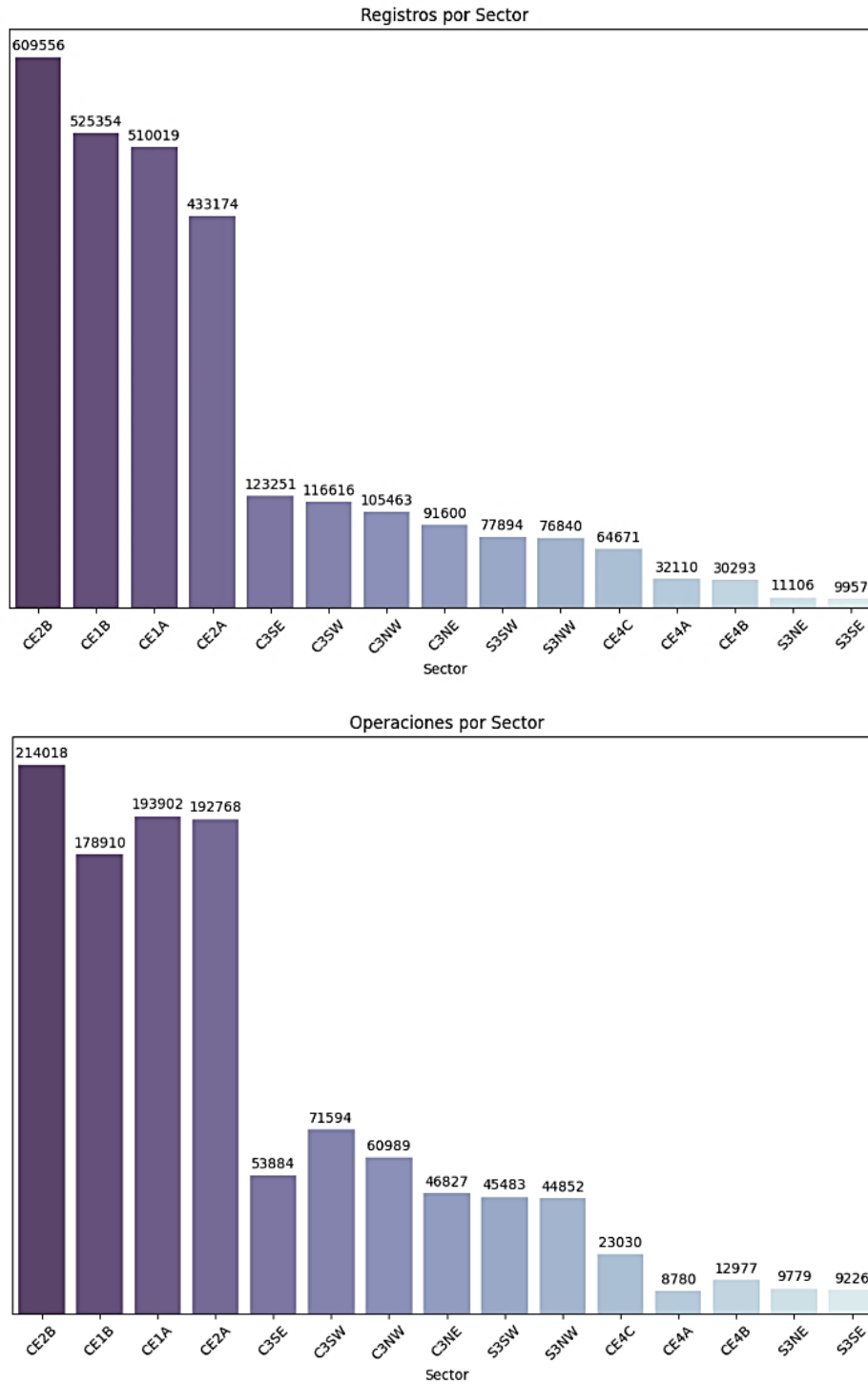
Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)



**Ilustración 18. Multivariado de nivel de vuelo y minutos por sector**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librería matplotlib, seaborn y comando de gráficos)

#### 4.1.4 CONCLUSIONES DEL EDA

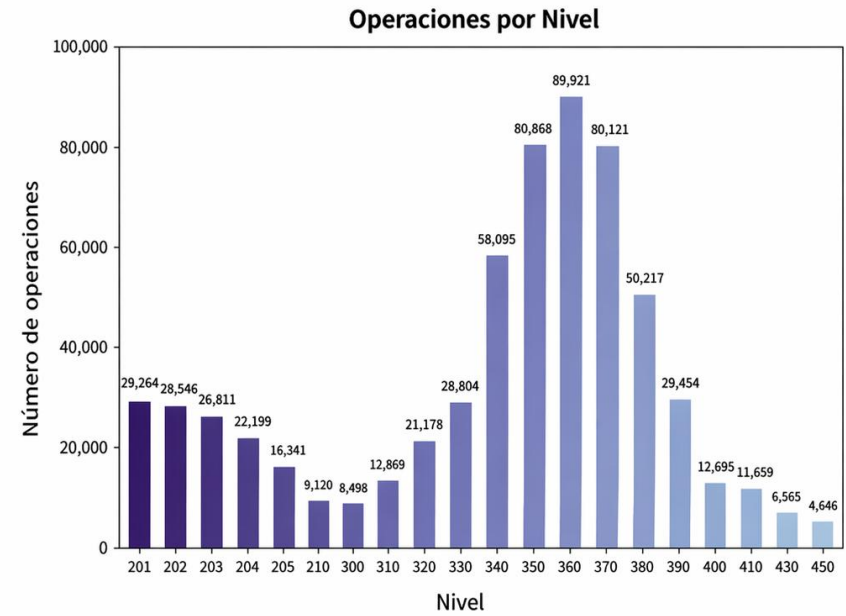
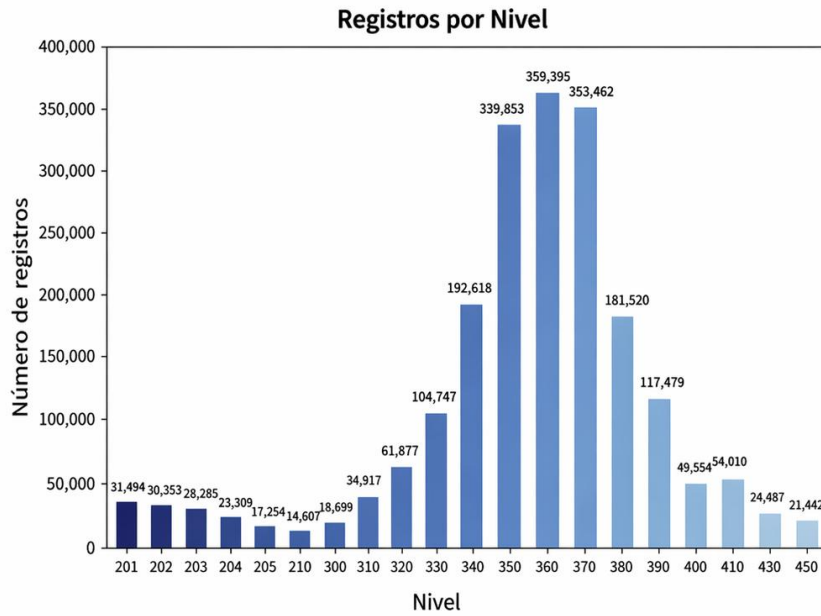


**Ilustración 19. Conteo de registros y operaciones por sector**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (librería matplotlib, seaborn y comando de análisis univariado)

El EDA indica que los estadísticos mantienen promedios relativamente estables, los cuales son afectados primordialmente por extremos significativos; considerando los estadísticos, se denota una marcada diferencia en el comportamiento de los resultados según la distribución sectorial. La previa ilustración detalla que los sectores CE2 presentan valores que tienen su mayor incidencia en la zona continental del espacio controlado; similar a esto, las millas promedio tienen mayor incidencia en la zona continental, por lo que, a simple vista, se puede inferir una relación entre estas dos variables. La relación entre las zonas y la incidencia infiere un desbalance en la asignación meramente por la tendencia del flujo aéreo en relación con las necesidades del mercado, las cuales, al no estar en un ambiente controlado, pueden variar por factores exógenos.

El procesamiento de los datos correspondientes a los periodos 2024 y 2025 ha considerado la integración de valores atípicos dentro de sí, esto con la finalidad de utilizar la métrica real y sin suavizarla de manera sintética; el efecto de esta decisión tendrá un efecto mínimo para los datos, pero brindará información relevante para el entrenamiento de los modelos, por lo que se decidió hacer uso de la data en su totalidad. Observando un comparativo bivariado de los resultados, detalla que el área continental presenta agrupación de datos más marcada, mientras que los sectores restantes presentan una incidencia menor.

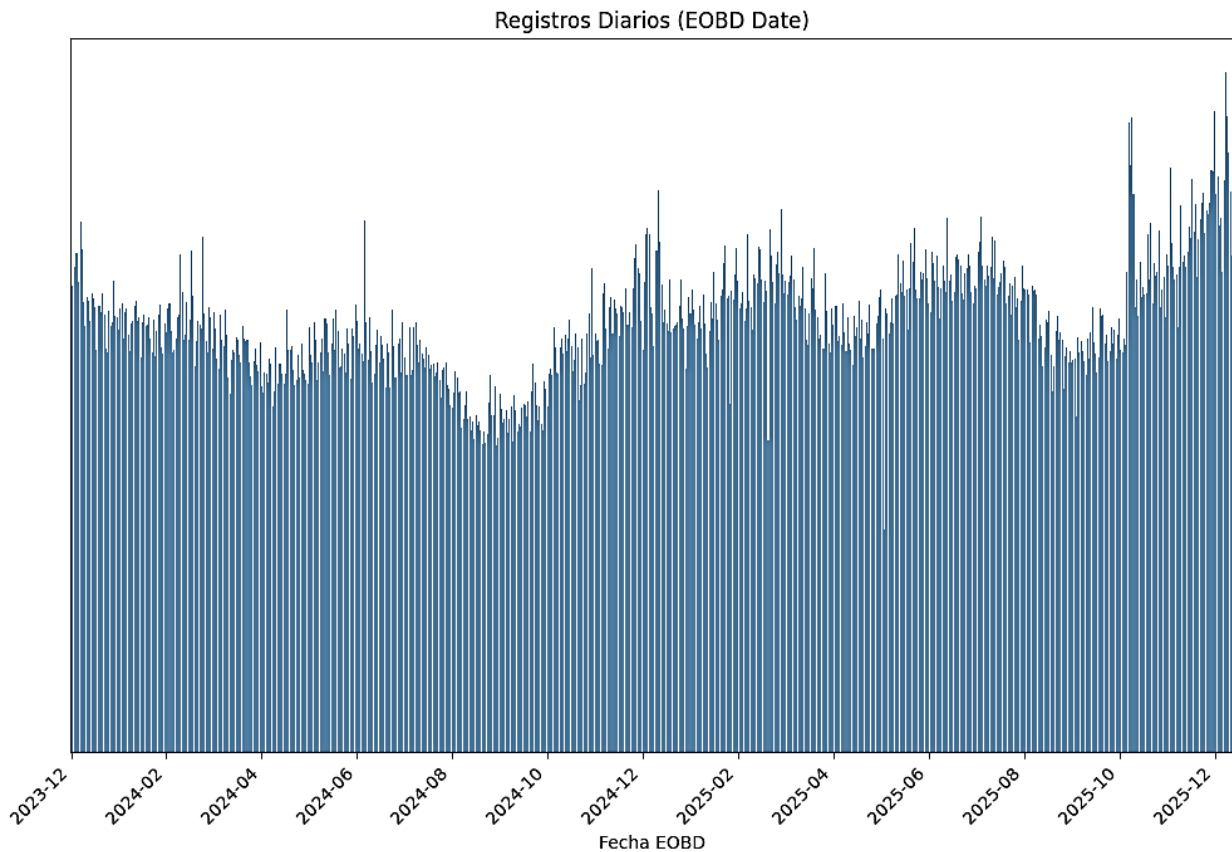


**Ilustración 20. Distribución de nivel de vuelo por registro y por operación**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (librería matplotlib, seaborn y comando de análisis bivariado)

El manejo de datos, la imputación utilizada y las gráficas exploratorias permiten visualizar de manera clara la distribución de parámetros respecto a los sectores; considerando la distribución de las gestiones, se observa una considerable diferencia entre estos, lo que afecta la proporción laboral asignada y podría tener impacto en la gestión del personal; teniendo un promedio de 473.66 millas y 64.35 minutos por vuelo, se considera que es de suma importancia realizar ajustes del manejo de las operaciones según los diferentes factores que tienen efecto en la gestión, principalmente el tiempo correspondiente a los viajes bajo su mando.

Considerando la distribución de los registros durante el periodo delimitado, es necesario tener presente la existencia de tendencias que afectarán el comportamiento de los datos; factores como guerra, escasez, turismo o demás variables exógenas no predecibles pueden tener efecto en el desempeño del modelo. La serie de tiempo se visualiza de la siguiente manera:



### **Ilustración 21. Demanda de la serie temporal**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (librería matplotlib, seaborn y comando de análisis univariado)

Considerando el impacto de la incidencia en las operaciones institucionales como la fatiga del personal, lo cual obliga a desarrollar estrategias para atender las operaciones de manera óptima; considerando esto, la delegación y el balanceo de las operaciones son necesarios para estructurar de manera proporcional las gestiones. La gestión de un sistema que afiance a los controladores es vital para un desarrollo sostenible, por lo que el uso de predicciones es una herramienta que puede utilizarse en un alto grado y sin presentar desventajas.

## **4.2 INFORME DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

La extracción de datos es una de las secciones relevantes de la investigación, ya que determinará la calidad del estudio con base en la información procesada. Para integrar datos de calidad al estudio, es necesario planificar la adquisición, manejo y demás consideraciones respecto al uso de información de las fuentes utilizadas; este proceso se estructura de la siguiente manera:

### **4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN**

El pipeline de extracción de datos se ejecutó por medio de batches mensuales correspondientes al API ATFM, considerando el repositorio existente para el periodo 2024 – 2025; la implementación de esta extracción se llevó a cabo entre el día 1 y el día 25, considerando el tiempo óptimo para procesar y validar la data. Debido al requisito temporal existente, la planificación e integración de la información se realizaron en base al calendario de actividades elaborado para la obtención y revisión de datos. Dentro de estas etapas se denotan dos partes fundamentales para la integración exitosa, las cuales se detallan de la siguiente manera:

- La etapa inicial plantea los fundamentos de la investigación, analizando los conceptos relacionados a la problemática; esta fase tiene la finalidad de definir el tipo de información requerida y el método a implementar para su obtención. Al haber establecido los parámetros y el contexto de la investigación, se requiere solicitar la cooperación de los participantes sobre el uso de datos. La recepción de la data se estipula previo a los 20 días establecidos por la planificación; durante esta fase los recursos utilizados consistirán en herramientas de redacción, material para el sustento teórico y técnico, así como las solicitudes con las debidas autorizaciones para el acceso a los datos.
- La segunda etapa contempla la recepción y limpieza de los datos para su integración en estos al aplicativo para realizar el análisis exploratorio y posteriormente los modelos aplicables;

se establece un límite de 20 días para la limpieza, modelado y exploración de la data con la finalidad de utilizar esta en subsecuente interpretación. Esta fase del proceso requiere el uso de herramientas de redacción, estadísticas y modelado para utilizar los datos y transmitir la información necesaria; se utilizará la información recopilada para generar insights sobre la exploración de los datos, lo que permitirá contextualizar la investigación.

#### 4.2.2 PARTICIPANTES O FUENTES DE INFORMACIÓN

Para la investigación se utilizarán datos correspondientes a los registros electrónicos de CENAMER obtenidos mediante el uso del aplicativo ATFM, pertinentes únicamente a las gestiones realizadas dentro del territorio controlado. Estos datos se clasifican como una fuente secundaria y el universo de datos corresponde a los registros operacionales desde el periodo 2007, los cuales se redujeron utilizando como muestra censal temporal los registros postpandemia, específicamente los correspondientes a los periodos 2024 y 2025.

Debido al uso de series de tiempo, y con la finalidad de evitar errores de tiempo, se considera necesario utilizar la población finita para realizar el estudio; considerando lo establecido por Bryman (2016), el uso de muestras puede alterar la data obtenida por un muestreo erróneo, de igual manera, al considerar que el uso de las series de tiempo requiere continuidad, se estima como necesario el uso de la población. La población finita correspondiente al periodo 2024 y 2025 equivale a 5,744,961 registros, dentro de los cuales una considerable cantidad se realizaron fuera de la región, por lo que se decidió utilizar una poda poblacional y considerar un número efectivo de registros para una muestra censal temporal de 2,817,904 registros para el estudio.

#### 4.2.3 INSTRUMENTOS UTILIZADOS



**Ilustración 22. Despliegue de aplicativo ATFM - Air Traffic Flow Management -**

Fuente: Imagen extraída de aplicativo ATFM de CENAMER

Debido al carácter cuantitativo del estudio, las herramientas utilizadas corresponden a programas estadísticos, visuales y el aplicativo ATFM; estos se detallan de la siguiente manera:

- Excel cumplirá la función de almacenamiento y visualización para los datos brutos; considerando su limitado uso para procesamiento, este se utilizará como parte de la poda para desglosar las gestiones pertenecientes al área controlada.
- El diccionario de variables está formulado por la definición operativa de las variables y la aplicabilidad de estas dentro de la investigación; se implementa este para denotar el significado específico, el cual puede no ser del todo preciso al texto.
- Los aplicativos de redacción serán utilizados para listar las observaciones y hallazgos realizados, al igual que la base teórica y metodología en la cual se elabora la investigación. Este instrumento es un complemento analítico para una mejor estructura y entendimiento del personal no técnico.
- El módulo ATFM cumple la función de ser la fuente primaria de información; este es utilizado para el monitoreo de las aeronaves y la documentación de los registros respectivos.
- El cronograma de investigación representa la distribución de las actividades según el tiempo disponible; dentro de este se planifican las fases del estudio, por lo que funciona como la guía a seguir.
- El Diagrama de Ishikawa es un instrumento de análisis causal, el cual nos permite contextualizar de mejor manera el problema y tener mejor comprensión de los factores que afectan el estudio y el rubro al cual se orienta.
- El mapa de calor está compuesto por una matriz correlacional que permite observar la relación existente entre variables numéricas; este se realiza principalmente con el modelo de Pearson para poder detallar la correlación de variables.
- La matriz de operacionalización funciona como una tabla paramétrica de estudio; dentro de esta se detallan las variables y sus elementos correspondientes.
- Google Colab, herramienta la cual se basa en lenguaje Python para realizar sus operaciones, tiene función como el principal método de análisis, modelado y gestión de datos. Dentro de esta herramienta se realizarán pruebas de normalidad, hipotéticas, correlación y modelos

predictivos para la integración futura. Los principales modelos serán de regresión y series temporales.

Es noble destacar que dentro de este instrumento se realizaron las representaciones visuales necesarias, por lo que cumple parte de las funciones de una herramienta visual dentro del estudio. Además, dentro de estas herramientas los únicos parámetros de aleatoriedad corresponden a la partición de datos, la cual se realizó bajo los siguientes parámetros:

- Las particiones 90/10 correspondientes a la distribución del sector C3 se realizaron con `test_size=0.1`, `random_state=42`.
- Las particiones 50/50 realizadas para los registros C3N y C3S se realizaron con `test_size=0.5`, `random_state=42`.
- Los estadísticos descriptivos se utilizaron mediante los comandos Python para visualizar la matriz, parámetros, tipo de variables y demás datos correspondientes a esta temática previo al modelado de los datos.

#### 4.2.4 DIFICULTADES ENCONTRADAS

- Complicaciones respecto a la adquisición de datos fundamentadas en limitantes temporales para la coordinación con el supervisor ATFM que brindó su cooperación y solventadas mediante el uso de recordatorios (tanto de carácter digital como presencial) y la programación para el acceso al aplicativo ATFM.
- Considerando el cambio temático de la investigación, se presentaron limitantes de tiempo relacionadas a la obtención de datos, planteamiento de la investigación y definición de los parámetros para el uso óptimo de los datos. Solventado mediante la asignación de tareas, comunicación entre las partes involucradas (Institución – Investigadores), capacitación temática sobre las operaciones y revisiones periódicas del aspecto teórico de la investigación.
- Problemáticas relacionadas con la extracción de datos; dicho inconveniente se divide en dos secciones:
  - Conflictos sobre la capacidad de descarga del aplicativo, el cual permite únicamente extracciones mensuales de los datos, solventados mediante la descarga e integración de datos en una matriz unificada.

- Conflicto sobre la capacidad de almacenamiento del aplicativo Excel (el cual funcionaría como escrito base para integración en herramientas estadísticas); solventado mediante el seccionamiento de datos (estructuras semestrales) y su posterior unificación mediante comandos de concatenación.
- Conflictos sobre la integridad de la data debido a valores faltantes, lo cual se debe a la función de registro secuencial integrada a la API ATFM. Solventada mediante el uso de imputación longitudinal, rellenando valores repetitivos según la necesidad.

#### 4.2.5 CONSIDERACIONES ÉTICAS

La información utilizada para el estudio fue proveída por el coordinador ATFM mediante el aplicativo de la institución, por lo que la confidencialidad de esta corresponde a datos históricos publicados en la generación de reportes. Respecto al consentimiento de uso de la información, se utilizó un acta de “aceptación de uso de información”, comprobando la autorización de uso mediante la aprobación expresa de las autoridades competentes. Se hace mención de que los datos sensibles de la institución como datos financieros o relacionados al personal no serán solicitados, utilizados o divulgados; los ejemplos financieros presentados corresponden a supuestos económicos educativos; esto tiene la finalidad de prevenir divulgar información sensible o perjudicial.

La constitución de la república establece en el Art. 76 que “Se garantiza el derecho al honor, a la intimidad personal, familiar y a la propia imagen” (República de Honduras, 1982, p.12) por lo que nacionalmente este artículo ampara el derecho de los individuos a la privacidad y conservar su imagen; por otro lado European Union (2016) establece que la regulación 2016 | 679 tiene como finalidad la protección de datos de los individuos, la cual funciona como una guía para las otras naciones en operaciones relacionadas. La recolección de la información será gestionada mediante el coordinador utilizando los datos del aplicativo ATFM, una vez recibida será resguardada por los investigadores correspondientes, quienes al finalizar la investigación se encargarán de eliminar los datos a manera de proteger información sensible a largo plazo.

## 4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS APLICADAS

### 4.3.1 RESULTADOS CUANTITATIVOS

#### 4.3.1.1 PRESENTACIÓN DE DATOS

Al finalizar el análisis exploratorio de los datos, se presenta la información de los registros operacionales de CENAMER correspondientes a los periodos de 2024 a 2025 para la elaboración de la descripción de hallazgos para realizar la vinculación de los objetivos de la investigación y las pruebas estadísticas. La tabla presenta un conjunto variado de valores, los cuales se contextualizan en la representación de la siguiente manera:

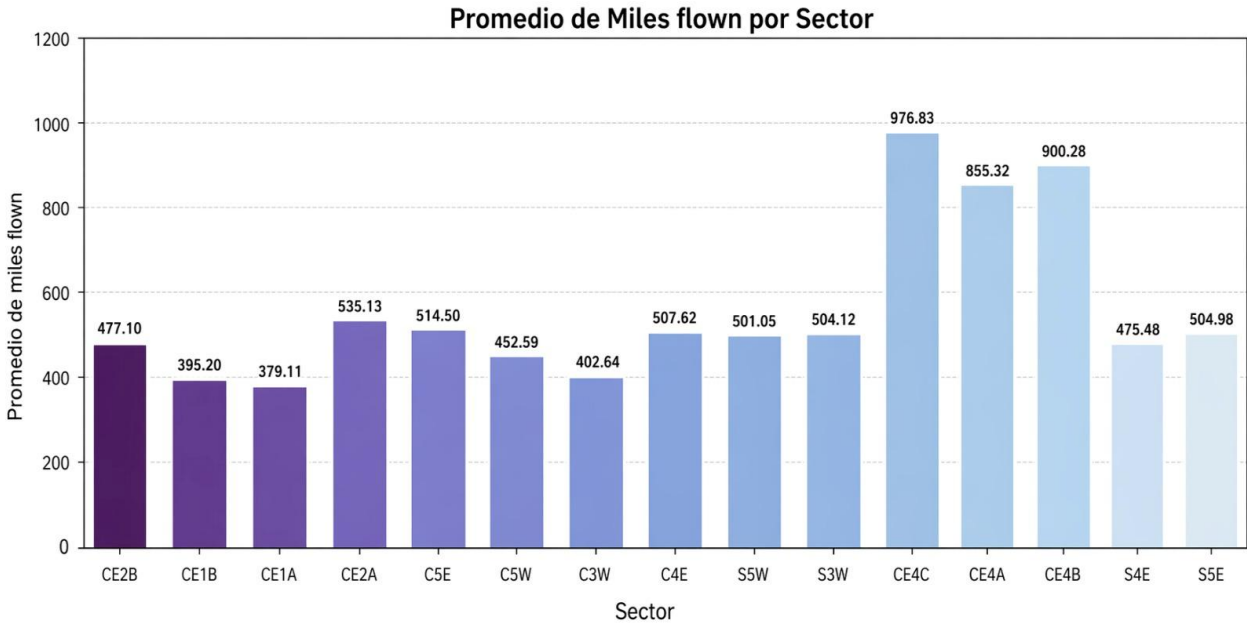
- **FplMsgID:** Corresponde al número identificado de las operaciones únicas de vuelo; este es de tipo nominal y se presenta como una secuencia de números dentro de la matriz.
- **Flight:** Distintivo de llamada de aeronave, es de tipo nominal y es representado por un código formado por símbolos alfabéticos y numéricos.
- **Register:** Matrícula de la aeronave es de tipo nominal y se representa por símbolos alfabéticos y numéricos.
- **Aircraft type:** Determinante del tipo de aeronave utilizada en el vuelo, es de tipo nominal y es representada por el código operacional establecido para este tipo de vehículos.
- **Departure / Destination:** Nombra el aeródromo de salida y de llegada; es de carácter nominal y es representada por la abreviación correspondiente a la ubicación.
- **EOBD date:** detalla la fecha de salida o “fuera de calzos”, es de tipo fecha y se representa por los datos de año/mes/día.
- **FIR entrance/exit datetime:** Detalla el momento en formato UTC (tiempo universal coordinado) como identificador de una entrada o salida de operación, es de tipo fecha – hora, y se representa por los datos de año/mes/día – hora: minuto: segundo.
- **Minutes flown:** Tiempo total de minutos reflejados por vuelo en espacio aéreo es de tipo numérico continuo y se expresa en enteros y decimales.
- **Miles flown:** Distancia total de millas reflejadas por vuelo en espacio aéreo es de tipo numérico continuo y se expresa en enteros y decimales.

- Level: Nivel de vuelo de aeronave en determinado sector de control, es de tipo numérico entero y se expresa en enteros.
- Sector: Configuración específica del espacio aéreo donde se encuentra asumido un vuelo, es de tipo nominal y se expresa según la categorización oficial realizada por CENAMER.
- Date time: Detalla la fecha y hora del progreso de vuelo, es de tipo fecha-hora y se representa por los datos de año/mes/día – hora: minuto: segundo.

#### 4.3.1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS HALLAZGOS

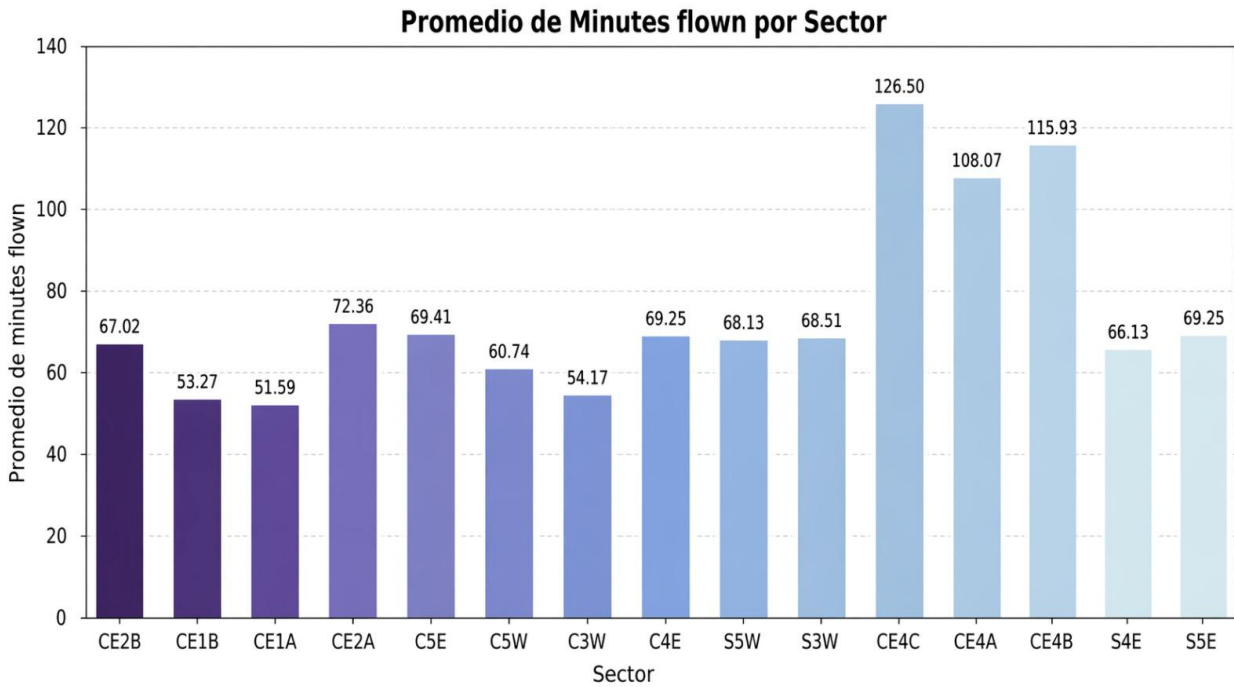
El proceso de hallazgos y tendencias identifica un mayor recorrido de las aeronaves cuando estas utilizan los sectores del Pacífico a diferencia de la zona continental. Los sectores del Océano Pacífico denotados como CE4A, CE4B y CE4C presentan una diferencia considerable respecto a los promedios existentes. Justificando esto, al tener una distancia de recorrido considerablemente más larga, las rutas oceánicas elevan el promedio de manera considerable a diferencia de los valores continentales, los cuales tienen similitud entre los diferentes sectores existentes.

Considerando los promedios de cada sector, se observa una similitud en cuanto a su distribución, pero debido a factores exógenos como lo es el tipo de aeronave utilizada o la velocidad de viaje, existen variaciones, principalmente para la variable de tiempo.



**Ilustración 23. Promedio de millas**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, gráfico de barras)

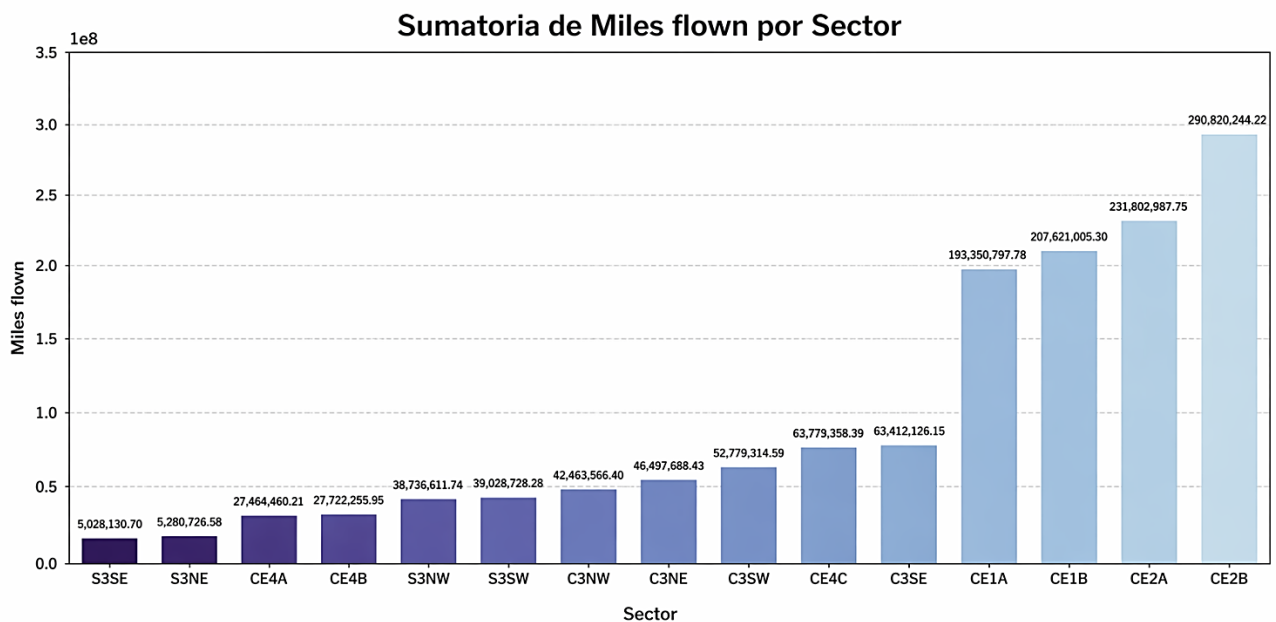


**Ilustración 24. Promedio de minutos**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, gráfico de barras)

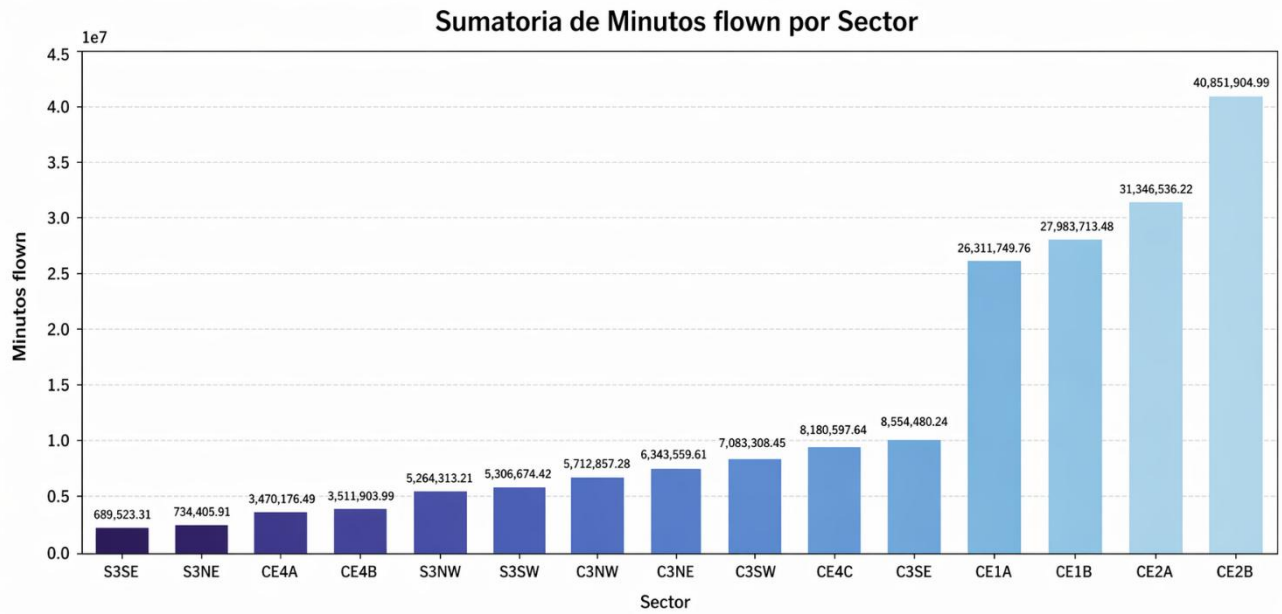
A diferencia del promedio, los totales correspondientes a las variables tienen un valor superior debido a que registran un número sustancialmente más elevado de operaciones; realizando el contraste entre los valores de vuelos, se expone que los sectores CE1 y CE2 presentan la mayor actividad de las operaciones. Los sectores mencionados previamente corresponden al servicio en la zona continental, indicador de viajes de poco millaje y duración, pero con la necesidad de realizarse con mayor frecuencia, lo que se traduce en mayor cantidad de operaciones a diferencia de los demás sectores de control.

Al sumar los resultados correspondientes, veremos que, similar a los promedios, existe una gran concentración de datos en los sectores intracontinentales; sin embargo, a diferencia de los promedios, esta concentración, debido a su alto grado de incidencia, está muy distanciada del resto. Se puede visualizar de la siguiente manera:



### Ilustración 25. Sumatoria de millas

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, gráfico de barras)

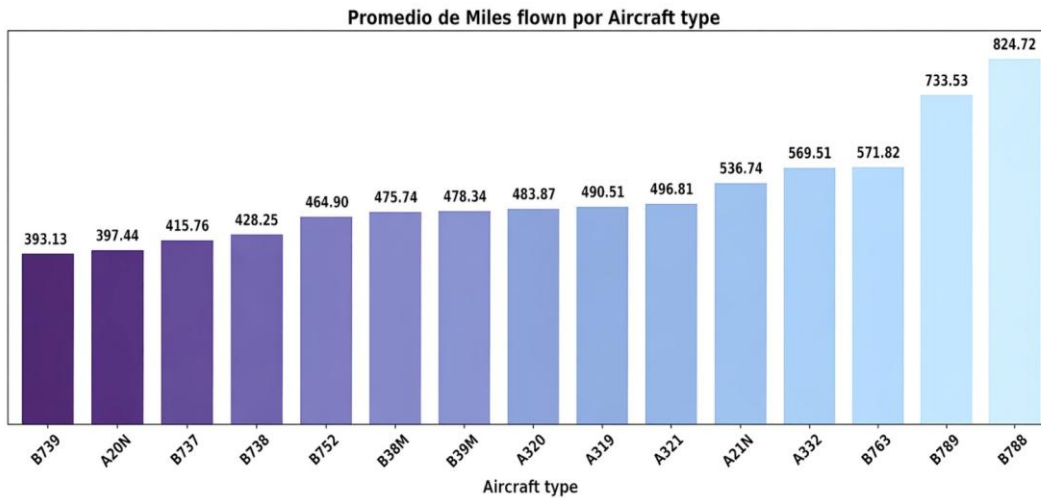


**Ilustración 26. Sumatoria de minutos**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, gráfico de barras)

Realizando un análisis del total de millas voladas, se puede observar una clara tendencia en cuanto a los sectores; por otro lado, esto tiene una similar relación al tipo de aeronave que se utiliza durante estas gestiones; dentro de este concepto se demuestra claramente la superioridad correspondiente a las aeronaves destinadas al sector comercial, lo que tiene relación con el alto número de operaciones realizadas en zonas comerciales y de transporte.

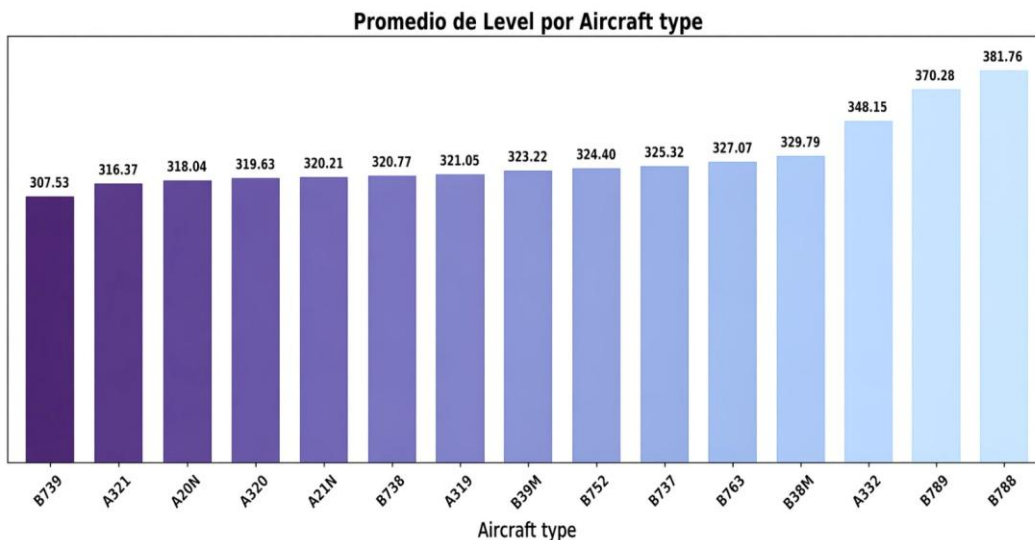
La gran afluencia de operaciones diarias correspondientes a este tipo de vuelos coloca a Boeing y Airbus como el tipo de aeronave más utilizado, estableciéndose como los indisputables líderes en la producción de aeronaves. Considerando el enfoque de producción para transporte de personas y la necesidad de realizar estos viajes, se observa una clara preferencia en cuanto al tipo de avión. La similitud existente entre las aeronaves es el concepto de que “8 millas recorridas por minuto” es la métrica promedio de la industria, la cual es utilizada por los controladores de manera empírica para tener un mejor panorama de la situación.



**Ilustración 27. Promedio de millas voladas por tipo de aeronave**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, gráfico de barras)

Entre los hallazgos, se menciona que la media de niveles de vuelo por tipo de aeronave indica que dentro de este conjunto destacan principalmente las aeronaves para negocios y privados. Ejemplo evidente de este hallazgo: se puede mencionar el Gulfstream y Bombardier. Se detalla que no se encuentran aeronaves de tipo comercial, esto debido a la tendencia de estas aeronaves a alcanzar una altura máxima de alrededor de 40,000 pies de altitud.



**Ilustración 28. Promedio de nivel de vuelo por tipo de aeronave**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, gráfico de barras)

Las operaciones para los periodos 2024 y 2025 presentan un incremento respecto al predecesor; lo cual se representa de la siguiente manera:

**Tabla 19. Desglose de operaciones por periodo**

MonthName	Periodo 2024		Periodo 2025		Sumatoria	
	Registros	Operaciones	Registros	Operaciones	Registros	Operaciones
Enero	125,247	21,824	123,518	21,887	248,765	43,711
Febrero	110,445	19,509	112,026	18,980	222,471	38,489
Marzo	120,242	21,124	130,748	21,624	250,990	42,748
Abril	106,791	19,176	117,359	19,838	224,150	39,014
Mayo	107,057	18,932	115,820	19,289	222,877	38,221
Junio	109,534	19,476	126,339	20,399	235,873	39,875
Julio	111,943	20,049	133,216	21,873	245,159	41,922
Agosto	106,418	19,175	128,501	20,832	234,919	40,007
Septiembre	89,747	16,003	107,831	17,383	197,578	33,386
Octubre	97,321	16,891	122,167	19,629	219,488	36,520
Noviembre	108,593	19,185	129,340	20,595	237,933	39,780
Diciembre	125,861	22,145	151,840	24,222	277,701	46,367
Total	1,319,199	233,489	1,498,705	246,551	2,817,904	480,040

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando librerías pandas, descriptivo de datos)

El comportamiento operacional por mes presenta estacionalidad, registrando picos durante enero y diciembre, siendo meses de alto flujo de pasajeros por festividades. De igual manera se evidencia que el mes de septiembre registró la menor cantidad de operaciones en ambos periodos, por lo tanto, se infieren tendencias en las operaciones anuales.

#### 4.3.1.3 RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS

Metodológicamente, el análisis realizado tiene relación con las preguntas, objetivos e hipótesis debido al marco secuencial que el proceso de investigación conlleva, por lo que, desde la perspectiva teórica, la relación proviene del desarrollo aplicado en la estructura donde el seguimiento de los pasos traza el estudio en una trayectoria específica.

Con respecto a las preguntas, el análisis se relaciona debido al desequilibrio en la distribución; la evidencia existente se presenta en la alta variabilidad del tiempo, outliers correspondientes a las variables de tiempo y distancia y la consideración de que estos factores afectan la carga asignable a los sectores utilizados (especialmente considerando la marcada diferencia de incidencia intracontinental contra los viajes sobre el Pacífico). Considerando esto, se

considera válido el uso de las preguntas de investigación para indagar en los posibles cambios generados por una redistribución.

Desde la perspectiva de los objetivos, similar a las preguntas de investigación, se menciona que la evidencia de la variabilidad y la existencia de fallas en la predicción ocasionan problemas al momento de planificar soluciones correspondientes. Mediante el análisis de los datos cuantitativos se puede denotar la relación existente con los objetivos, la cual se profundizará de mayor manera al integrar diferentes simulaciones.

Respecto a las hipótesis, la relación existente corresponde a la diferencia estadística de las variables y el error de predicción; en estas se denota que la variable con mayor efecto corresponde al tiempo, lo que tiene explicación de la carga y de manera subsecuente las pérdidas de eficiencia originadas del desbalance.

#### 4.3.1.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Debido a que los datos utilizados en el estudio no cumplen con los parámetros de normalidad de datos, se considera relevante el uso de la prueba Kruskal-Wallis para probar las hipótesis planteadas previamente; el uso de esta prueba se toma como la solución debido a que existen múltiples grupos a comparar, por lo que esta prueba es la indicada.

**Tabla 20. Pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis**

Prueba	Valor P	Interpretación (95% Confianza)	Interpretación (99% Confianza)
0 Sector vs Minutes flown	0	Rechazamos H0: Hay diferencias significativas ...	Rechazamos H0: Hay diferencias significativas ...
1 Sector vs Miles flown	0	Rechazamos H0: Hay diferencias significativas ...	Rechazamos H0: Hay diferencias significativas ...
2 Sector vs Level	0	Rechazamos H0: Hay diferencias significativas ...	Rechazamos H0: Hay diferencias significativas ...

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (Prueba Kruskal-Wallis)

Con la finalidad de realizar las pruebas, se utilizaron escenarios para un nivel de confianza del 95% y del 99%; en conjunto con el tamaño poblacional finito utilizado, se minimiza el riesgo de cometer errores de tipo I y tipo II. (Rodríguez, 2010)

**Tabla 21. Pruebas de correlación**

	Par de Variables	Spearman	Kendall
0	Minutes flown - Miles flown	0.9747	0.885
1	Miles flown - Level	0.2958	0.2036
2	Level - Minutes flown	0.2606	0.1795

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (Pruebas de Spearman – Kendall)

Respecto a las hipótesis planteadas, las pruebas realizadas detallan que tanto para el 95% como para el 99% de confianza rechazan  $H_0$ , indicando que la media de los datos tiene diferencias estadísticamente significativas. Se valida el supuesto al minimizar los errores de tipo I y II; detallando, a pesar de la alta correlación existente entre minutos y millas, estas no presentan distribuciones idénticas en términos no paramétricos. Las medidas correspondientes al nivel de vuelo cumplen con la expectativa de diferencia. Al ser estadísticamente diferentes, cada una de las variables integra información única y relevante al estudio, por lo que se refuerza la idea de estructurarlas como elementos separados para posterior análisis.

Integrando los hallazgos referentes a la evaluación de los modelos aplicados, se realizó un comparativo de cuatro modelos predictivos para su integración en las predicciones de la serie de tiempo; para el estudio, considerando la correlación existente entre variables y los outliers de las variables, se hará uso de modelos que permitan procesar la data sin verse afectada o inflada de manera artificial. Los modelos ARIMA, SARIMA, Robust Regression y Lasso Regression serán utilizados para estudiar el ajuste de estos a las variables.

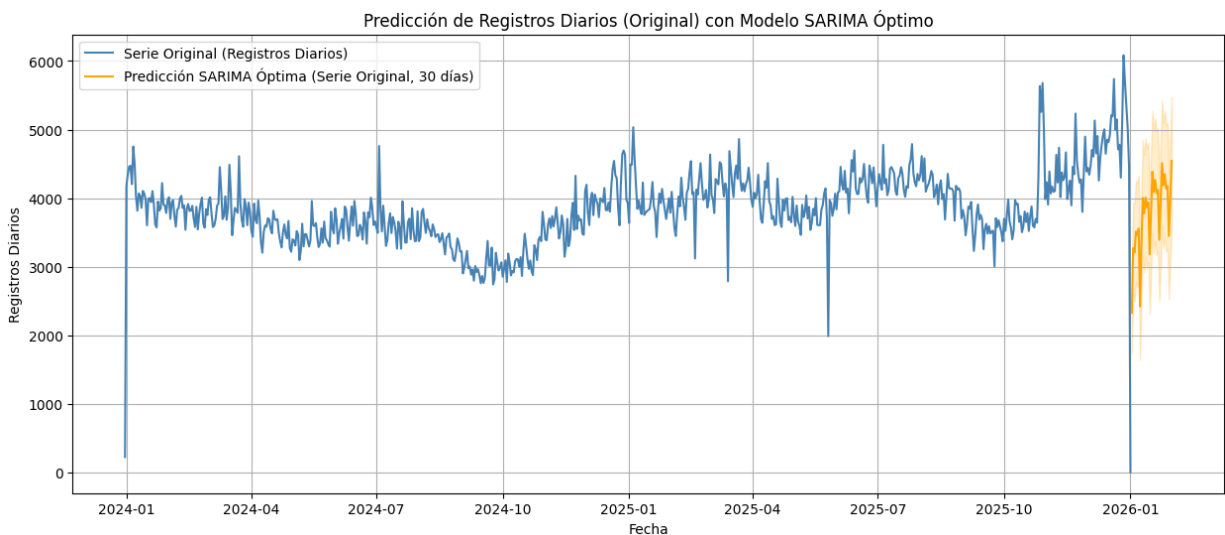
Mediante el uso de parámetros dentro de los modelos se plantea validar el ajuste de estos al compararlos con los datos reales de los registros del aplicativo ATFM. Se detalla que se utilizarán dos modelos de series de tiempo y dos de regresiones, donde se buscará estructurar de la manera más eficiente los modelos para captar la tendencia creciente del modelo y penalizar la inflación.

El modelo SARIMA, el cual contempla un modelo temporal con estacionalidad, permite estimar tendencias de las series mediante el ajuste basado en patrones. Su principal ventaja, como lo establece su nombre, es la habilidad de capturar estacionalidades, mediante las cuales logra identificar tendencias, ciclos y demás; este modelo, debido a su especialización dentro de las series

de tiempo, presenta los mejores resultados y esto se alinea con las características del modelo como tal. Dentro del ámbito de servicio aéreo, el uso de la estacionalidad se presenta como uno de los grandes factores dado que este rubro por naturaleza es estacional.

Las mayores limitantes de este modelo se reflejan en la necesidad de ajuste, donde los valores deberán ser detallados para lograr predicciones efectivas. Las limitaciones también se dan a raíz de sus fortalezas, al ser un modelo de estacionalidad, este tiene dificultades para integrar la linealidad, por lo que es una herramienta especializada.

El modelo SARIMA presenta el segundo RMSE y el mejor MAE del conjunto, de igual manera, al ser una serie temporal, la medida R-cuadrado no resulta efectiva, por lo que se detalla que entre las series temporales tiene el menor AIC, lo que indica mejor rendimiento en comparación con el modelo ARIMA; debido a esto, este se convierte en el óptimo modelo para implementar en las operaciones.

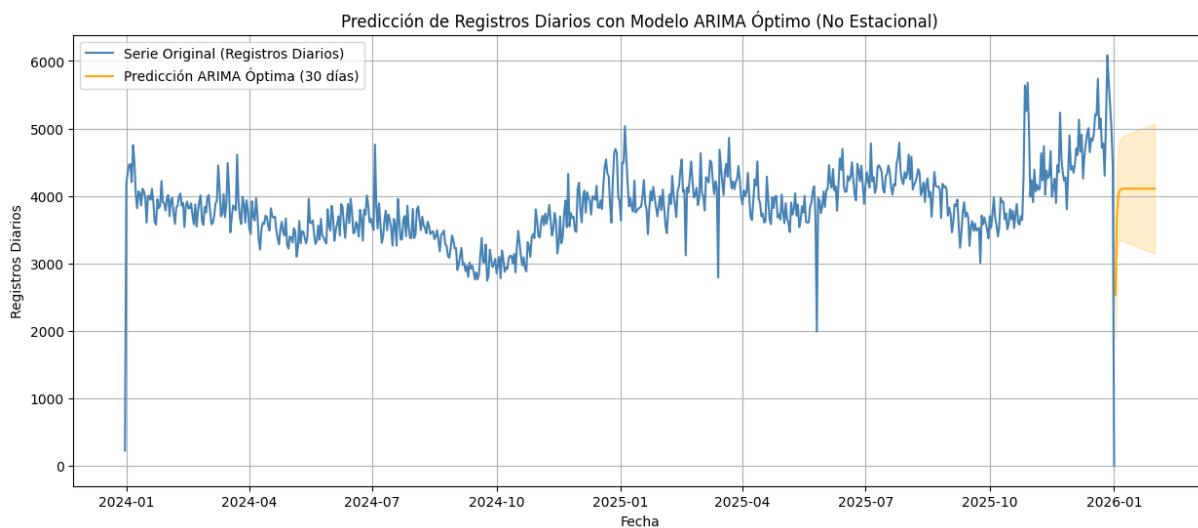


### Ilustración 29. Modelo SARIMA

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

El modelo ARIMA es un modelo utilizado para las dependencias temporales y no estacionariedad con enfoque en el análisis y pronóstico de series temporales; la selección de este modelo para pruebas se basa en su potencial para capturar de manera correcta la autocorrelación, lo cual representaría la dependencia temporal. De igual manera, este modelo es capaz de captar las tendencias gráficas por medio de la diferenciación y realizar un ajuste estadístico de alto grado (el cual se ve reflejado en el RMSE).

La mayor desventaja de este modelo es integrar la estacionalidad de los datos, por lo que es necesario aplicar una prueba ADF para validar estacionalidad y en caso de no aplicar, crearla de manera que se pueda utilizar el modelo; de igual manera, la necesidad de la elección de parámetros y que se asume la linealidad de los datos causa problemas al momento de integrar datos complejos. Este modelo, si bien tiene un ajuste excepcional, no puede producir ciclos semanales como lo demanda el rubro. Este modelo presenta el segundo mejor rendimiento, con un RMSE aún mejor que el SARIMA, sin embargo, con un AIC menor, por lo que al utilizar este como método de medición, se considera que no presenta la mejor predicción para la data.



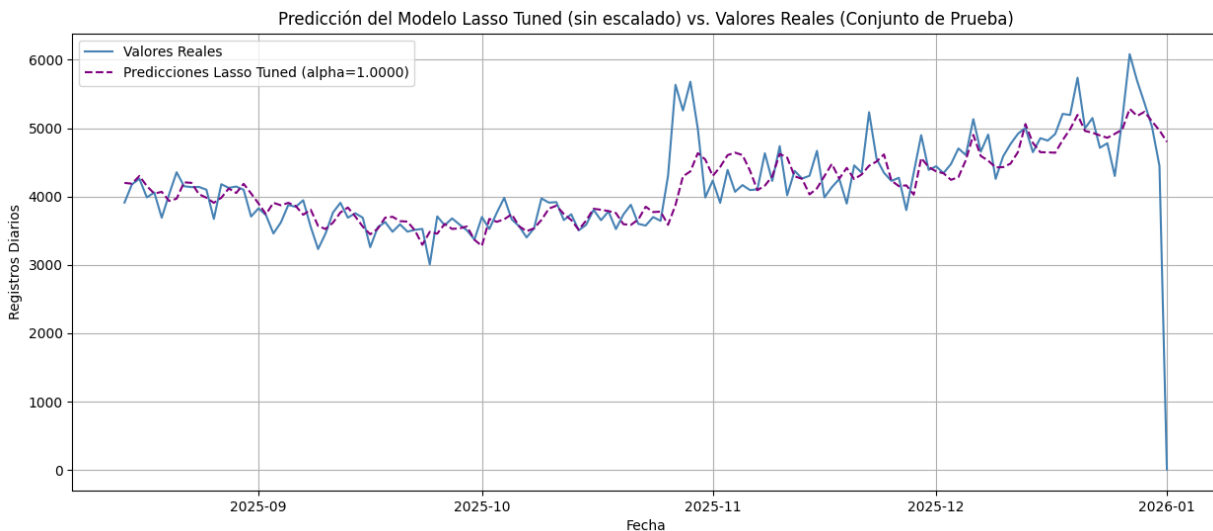
### Ilustración 30. Modelo ARIMA

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

El modelo Lasso, al funcionar como una extensión del OLS, regulariza L1 y penaliza los coeficientes según la selección de variables; la principal ventaja del modelo es la reducción del sobreajuste causado por la complejidad de los datos, lo cual puede tener efecto al tomar consideraciones sobre las variables utilizadas. Finalizando con el menor rendimiento RMSE y MAE, pero un R-cuadrado menor que el de la regresión robusta, se detalla que este modelo no presenta el mejor ajuste en relación con los datos, por lo que no se considera óptimo.

Similar al OLS del cual se extiende, el modelo de Lasso presenta la desventaja de no modelar la estructura temporal de los datos. Este modelo requiere de normalización para poder trabajar apropiadamente y referente a los datos, puede penalizar la relación existente entre variables, por lo que se puede subestimar la relación dentro de los modelos. Este modelo, si bien

tiene considerable utilidad para utilizarse debido a los retrasos integrados y la característica de simplificación del modelo, al ser una regresión, presenta dificultades para aplicarse en modelos con alta estacionalidad, por lo que puede considerarse como no apto para realizar predicciones de series de tiempo.



### Ilustración 31. Modelo Lasso Regression

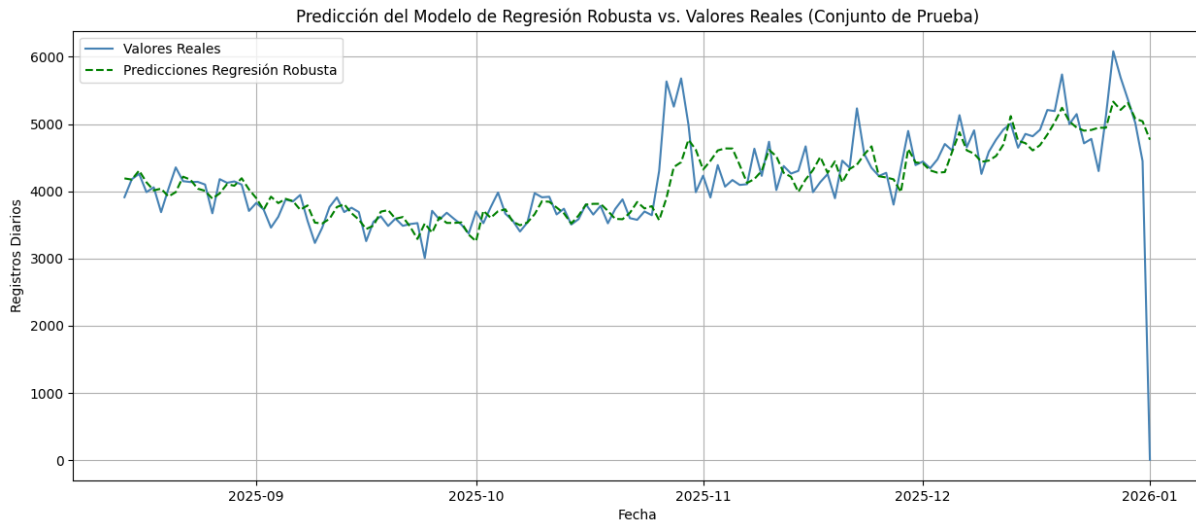
Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

El modelo de Robust Regression o RLM es una extensión de la regresión lineal diseñada para reducir la distorsión causada por los valores atípicos de los datos; esto permite que las métricas comparativas no sean afectadas de manera extrema por estos y la implementación no se vea afectada por complicaciones en la interpretación de los datos. La principal ventaja de este modelo corresponde a la capacidad que tiene de evitar ser influenciado por los outliers, lo cual se refleja en las métricas de RMSE y MAE. A pesar de presentar un R-cuadrado mayor que el modelo de Lasso, presenta un mejor rendimiento con un RMSE y MAE considerablemente menor que este.

Al utilizarse dentro de un rubro como lo es la aviación, este modelo, al no ser influenciado en gran manera por los outliers presenta una mayor estabilidad para los datos, lo cual dentro de situaciones reales presenta una fortaleza al identificar que los outliers no forman parte de las series normalmente; esto se acopla con la facilidad de uso existente, donde no se requiere de parámetros, normalización o factores estrictos para tener un buen funcionamiento.

Por otro lado, se toma en cuenta que este modelo no tiene en consideración las dependencias temporales (por lo que no se captura la autocorrelación); de similar manera, no capta los patrones

cíclicos observados dentro del rubro. Esto causa que las interpretaciones de este modelo, debido a la falta de estacionalidad, sean deficientes o limiten la precisión predictiva del modelo respecto a los datos.



### Ilustración 32. Modelo Robust Regression

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

#### 4.3.2 ANÁLISIS CUALITATIVO

##### 4.3.2.1 CATEGORÍAS O TEMAS EMERGENTES

A pesar de la predominancia de datos numéricos utilizados para el estudio, es necesario reconocer que dentro de esta temática surgen diferentes consideraciones sobre el desarrollo futuro de la gestión. El marco legal del rubro, al igual que los reportes generados por la institución, permite identificar categorías cualitativas que tienen efecto en el tema estudiado:

- Existen problemáticas relacionadas a la delimitación de sectores aéreos, lo cual tiene implicaciones geográficas y las cuales deben someterse a aprobación por parte de CENAMER y la OACI. (OACI, 2006)
- Existe un riesgo operacional relacionado con la fatiga y la distribución de carga laboral, según los lineamientos establecidos por la OACI. (OACI, 2016)
- Problemática interna por la capacidad de respuesta por parte del personal; si bien existe la posibilidad de atención para más gestiones, el ritmo de trabajo y la capacidad teórica de las herramientas no podrán operar a niveles sostenibles.

#### 4.3.2.2 CITAS O EJEMPLOS

Fundamentando los aspectos legales y regulatorios del ámbito aeronáutico, se hace referencia a la capacidad jurídica de la OACI respecto a gestiones relacionadas expresamente en el Artículo 47 del Convenio de Aviación Internacional:

La Organización gozará en el territorio de todo Estado contratante de la capacidad jurídica necesaria para el ejercicio de sus funciones. Se le concederá plena personalidad jurídica en cualquier lugar en que ello sea compatible con la constitución y las leyes del Estado del que se trate. (OACI, 2006, p.13)

De similar manera, OACI (2020) detalla la urgencia del manejo de la carga laboral donde 40% de los errores en procedimiento son ocasionados por la falta de descanso apropiado. Este extracto documental dota de validez la propuesta existente de reducción de utilización en los sectores operativos para reducir el desbalance y de esta manera prevenir errores ocasionados por fatiga.

Desde una perspectiva nacional, el código de trabajo establece en el Artículo 96, numeral 12 por la Secretaria de trabajo y seguridad social (2024) que “Exigir la realización de trabajos que ponen en peligro la salud o la vida del trabajador cuando dicha condición no este expresamente convenida” (p.35), estipulando el cuidado requerido por parte del patrón por el bienestar de sus empleados, considerando que un ritmo de trabajo laboral perjudicial implica violentar dicha regulación.

#### 4.3.2.3 INTERPRETACIÓN Y MARCO TEÓRICO

La asimetría existente para las variables numéricas no solo representa un hallazgo estadístico, sino que representa una prueba de la teoría de colas implementada como una teoría de sustento en el Capítulo 2 (Bernal Torres, 2022). Mediante la implementación del modelo predictivo, será posible anticipar periodos de alta demanda, donde el cuello de botella en la red será validado; mediante la preparación previa a este periodo, se podrá distribuir la carga de manera que se obtenga un flujo constante de aeronaves por debajo de un umbral crítico, pero no incurriendo en la subutilización de recursos.

Respecto a los datos numéricos, la distribución irregular de estos nos indica variabilidad dentro de las operaciones; sin embargo, al tener distribuciones leptocúrticas se observa una

marcada concentración de datos, por lo que se pueden establecer parámetros para esto. Ejemplificando, la distribución de control sobre periodos de corta duración o larga puede ser beneficiosa para establecer controles o rotaciones en caso de descansos requeridos. En este aspecto, la predicción realizada para las operaciones indica las temporadas donde se requiere mayor uso de recursos, por lo que será necesario tomar estas consideraciones al momento de estructurar los planes de respuesta.

Si bien se menciona esto, la teoría de la demanda y oferta no se aplica en su totalidad a este rubro, por lo que la optimización es necesaria para poder suplir la mayor parte de la demanda, siempre considerando el bienestar de los controladores al momento de distribuir las asignaciones.

#### 4.3.2.4 TRIANGULACIÓN

Desde el eje cualitativo, las regulaciones del Anexo 19 de la OACI y las RAC-ATS advierten de la sobrecarga operativa al utilizar sectores asimétricos, lo que aumenta de manera exponencial el riesgo de incidentes. Al triangular ambos ejes, se comprueba la viabilidad y urgencia de la hipótesis central: la implementación algorítmica para predicciones de flujo debe usarse como un instrumento vinculante para la reducción en un 10% de la capacidad máxima asignada, logrando armonizar la demanda matemática con los límites de seguridad humana exigidos por las regulaciones.

Al integrar la evidencia estadística del documento con la base teórica existente, se obtiene validación sobre la información en la convergencia de estos dos aspectos. Cuantitativamente, las pruebas no paramétricas evidenciaron un desbalance respecto a la distribución de los sectores; se demostró que, aun cuando las variables tienen un alto índice de correlación, la diferencia estadística y conceptual de estas requiere que sean tratadas como conceptos diferentes. Cualitativamente se ha establecido, mediante el marco conceptual, que las regulaciones internacionales y nacionales tienen principios que velan por el bienestar de los controladores, fundamentando la línea de pensamiento de que una distribución desproporcional presentaría un riesgo operacional.

Al considerar ambos aspectos, se infiere la necesidad de implementar un estudio con la finalidad de mejorar las operaciones internas; al integrar modelos predictivos de flujos, se facilitará la preparación de recursos requeridos para afrontar diferentes escenarios. Al tener la capacidad de ajustar los parámetros que afectan la distribución laboral, la cual requiere de equilibrio y acatamiento de lineamientos, se mejora la eficiencia y a consecuencia de los ajustes se reduce la

pérdida de recursos por subutilización o ineficiencia.

## 4.4 ANÁLISIS INFERENCIAL Y MODELOS APLICADOS

### 4.4.1 ANÁLISIS INFERENCIAL

**Tabla 22. Cuadro comparativo de modelos probados**

K	Modelo	RMSE	MAE	R-cuadrado	R-cuadrado Ajustado	AIC
0	Lasso Regression (sin escalado)	523.16	257.08	0.42	0.27	NaN
1	ARIMA (No Estacional)	356.32	207.52	NaN	NaN	10,511.91
2	SARIMA (Estacional)	389.76	198.35	NaN	NaN	10,219.97
3	Robust Regression	518.55	254.15	0.44	0.28	NaN

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando comando de recopilación y creación de tabla)

Presentado el mejor balance entre el RMSE, MAE y AIC, el modelo SARIMA se fundamenta como la mejor alternativa en la captación de datos y el ajuste del modelo a los datos. El RMSE de SARIMA, el cual se presenta como el segundo mejor del conjunto, presenta un ajuste comparable al modelo ARIMA (el cual posee el mejor ajuste) y al tener un mejor MAE y AIC, se considera este como el más apropiado para la integración. Es importante mencionar que ambos modelos de series temporales presentan el mejor ajuste respecto al modelo debido a la capacidad existente de estacionalidad o autocorrelación; por otro lado, las regresiones al suponer linealidad carecen de un ajuste apropiado debido a no captar la complejidad de los datos.

Para poder explicar de mejor manera los modelos, el cuadro comparativo de la tabla 22 nos ilustra los resultados correspondientes a los diferentes modelos utilizados; el RMSE comparativo entre estos modelos se utiliza para tener una mejor comprensión del error cuadrático de la media, lo que nos permite tener una mejor comprensión no solo del error estadístico del conjunto, sino del riesgo operativo existente dentro de los datos (el cual mientras más elevado presentara un mayor riesgo). Por otro lado, el MAE se utiliza de similar manera, pero los errores tienen un peso igual, por lo que se dan “reales” los que en ciertas instancias pueden obviar consideraciones relevantes para el modelo.

En los modelos de series de tiempo por otro lado se hace uso de AIC, el cual permite tener una métrica representante de la “bondad” del ajuste; mediante el uso de este como medida, se puede obtener el valor óptimo para los parámetros, así como tener una base sólida al momento de juzgar la estructura de un modelo en base a su eficiencia sin sobreajuste.

Para el estudio actual, el RMSE se toma como una de las métricas principales para la evaluación de modelos debido al rubro donde se está aplicando; en la industria de aviación, es necesario que el modelo tenga en consideración el peso de los escenarios, variaciones o demás factores que tengan efecto en la certeza del modelo, por lo que el RMSE presenta una mejor alternativa al MAE debido a que se alinea más con el propósito del estudio. Por otro lado, en las series de tiempo se tiene en consideración el AIC debido a cómo este tiene importancia relacionada al ajuste de los modelos; para la serie de tiempo, si bien es importante tener métricas de error, la integración del AIC para mejores parámetros sería más relevante al estructurar este tipo de modelos.

El sobreajuste de modelos es una de las mayores problemáticas para los modelos predictivos, por lo que al utilizar el AIC para verificar que el modelo sea estadísticamente eficiente sin crear un sobreajuste es necesario para las series de tiempo. Esto asegura que el modelo con el mejor ajuste y un error aceptable sea considerado como la mejor alternativa operativa.

Los modelos seleccionados tienen la finalidad de reducir el sobreajuste causado por factores atípicos y de esta manera presentar una mejor predicción comparativa al uso de otros modelos. La correlación existente entre millas y minutos ocasiona que los modelos deban ser robustos para poder identificarla, de esta manera penalizando esta correlación para la toma de decisiones y la interpretación de los modelos, reduciendo de esta manera la inflación sintética.

Se infiere que al tener elementos atípicos o con distribuciones atípicas, los modelos deberán extraer datos respecto a las relaciones existentes; sin embargo, debido a la necesidad de volúmenes masivos de datos para ajustar los parámetros a una realidad operacional, es necesario mencionar que las interpretaciones sobre estacionalidad, relación y demás factores influyentes pueden limitarse al no tener un mayor grado de información, lo que afectaría los resultados y modelados.

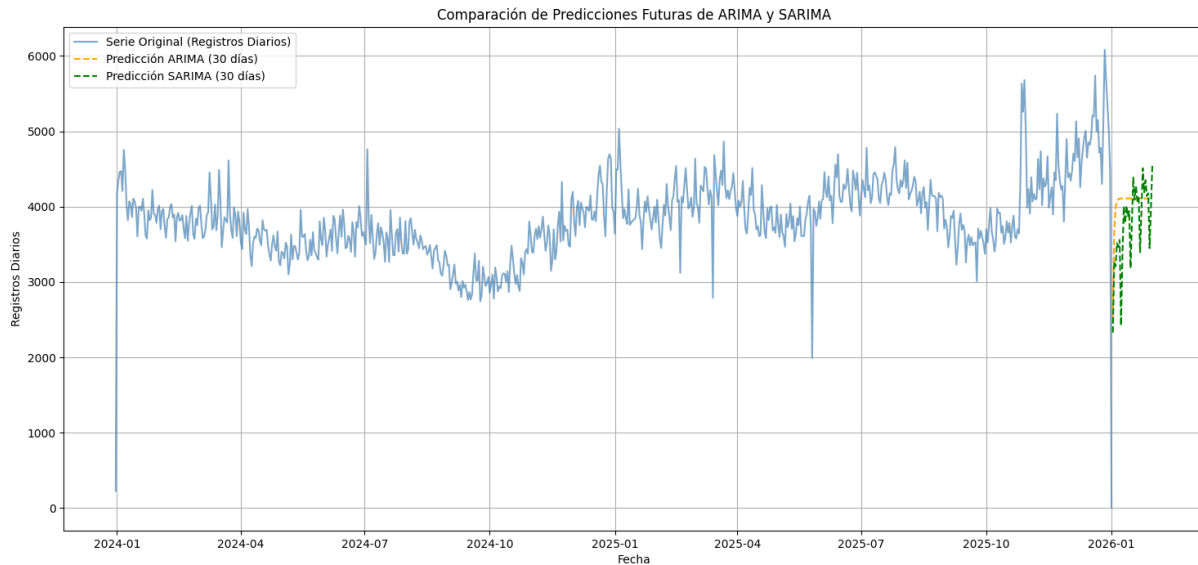
Para corroborar el uso del modelo indicado, es necesario validar la estacionalidad de las opciones, por lo que se ha integrado el P-value de la prueba Dickey-Fuller para verificar el cumplimiento de este. Para esta prueba, se plantean las siguientes hipótesis:

**Tabla 23. P-value para prueba Dickey-Fuller**

<b>P-value</b>	<b>Hipótesis nula</b>	<b>Hipótesis alternativa</b>
0.1390	H0: No se niega la estacionalidad en las fechas EOBD en el conjunto de datos.	H1: Se niega la estacionalidad en las fechas EOBD en el conjunto de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el valor P-value (0.1390) es mayor que los valores de confianza del 95% y 99%, se concluye que no existe estacionalidad en las fechas EOBD en el conjunto de datos, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa reflejada en la tabla 26. Esta prueba es beneficiosa para los modelos en el proceso de predicción.



### **Ilustración 33. Predicción de modelo ARIMA y SARIMA**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

Analizando las métricas de los modelos utilizados, se menciona que los resultados de ARIMA y SARIMA presentan la mayor eficiencia para la predicción de datos; esto se debe a sus características especializadas para series temporales, lo que permite un ajuste basado en el aspecto temporal en comparación con los demás modelos. Utilizando las métricas como base para el análisis, se detalla que el uso de los modelos de series de tiempo sería la mejor alternativa para la implementación de predicciones para la institución; al alimentar estos con una mayor cantidad de datos, se infiere que el ajuste del modelo aumentará proporcionalmente al proceso de aprendizaje.

#### 4.4.2 MODELOS APLICADOS

**Tabla 24. Cuadro de parámetros por modelo**

Modelo	Parámetros
0	Lasso Regression (sin escalado) lag_max=30, alpha=1.0000
1	ARIMA (No Estacional) order= (1, 1, 2)
2	SARIMA (Estacional) order= (1, 0, 1), seasonal_order= (1, 1, 1, 7)
3	Robust Regression lag_max=30

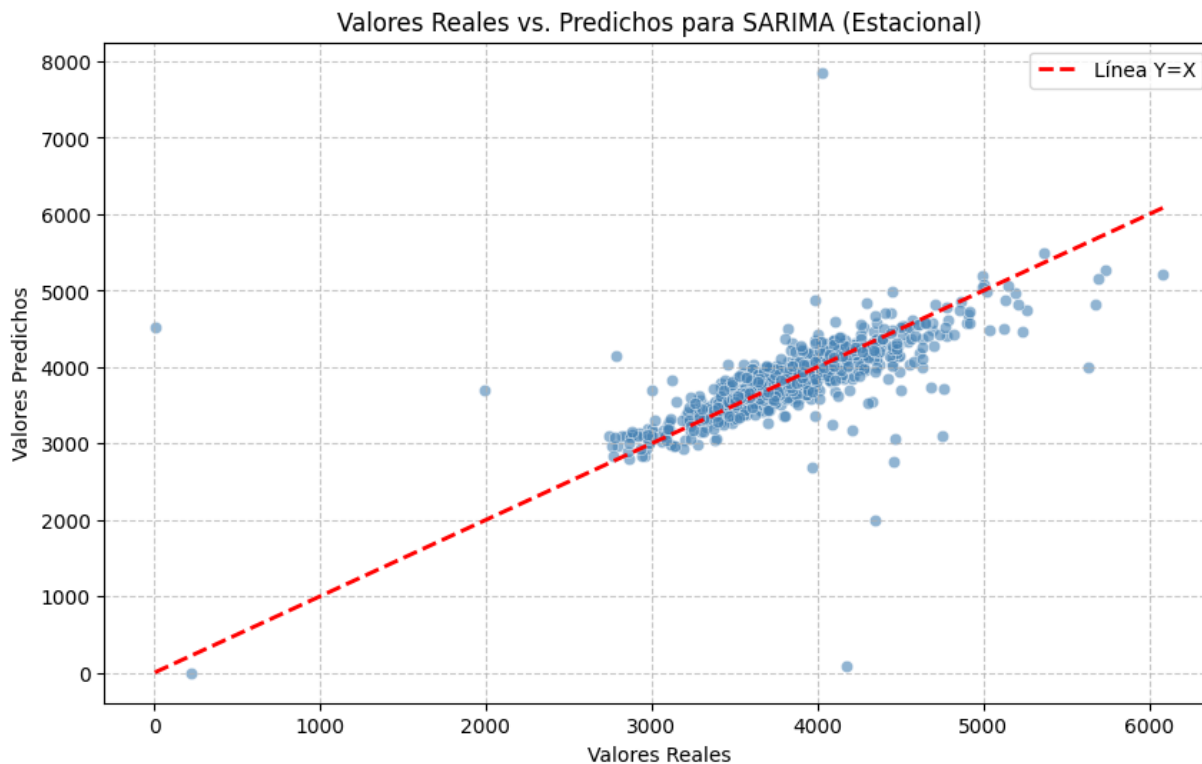
Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab (utilizando comando de recopilación y creación de tabla)

En la tabla 24 acerca de los parámetros por modelo, los valores P, D y Q en los modelos de ARIMA y SARIMA exponen la composición y estructura de la serie temporal que definen la capacidad de capturar patrones y tendencias dinámicas en los datos. En la investigación, el valor P que trata acerca del orden autorregresivo establece el número de rezagos acerca de la variable dependiente y permite modelar la vinculación temporal entre las observaciones. El valor D que es el grado de diferenciación denota la cantidad de veces que la serie ha sido remodelada para lograr estacionariedad, lo cual es un estado necesario para eludir tendencias falsas y respaldar la autenticidad del modelo. Finalmente, el valor del parámetro Q acerca del orden de media móvil cautiva la incidencia de los errores anteriores sobre el valor presente para modelar la composición del ruido en la serie.

Para el modelo SARIMA, los valores se integran con componentes estacionales (P, D, Q, s), donde el valor s indica la frecuencia del patrón estacional. En la presente investigación,  $s=7$  ya que se asocia a ciclos semanales de las operaciones aéreas. La elección de estos valores se ejecutó mediante los criterios de información como el ACF, PACF y AIC, lo que hizo posible la delimitación de una estructura ideal que mantiene un balance en la precisión de predicción del modelo. Esta composición asegura que el modelo sea capaz de capturar la dinámica y variaciones estacionales de las operaciones de tráfico aéreo en CENAMER, cooperando con una predicción consistente y aplicable en la parte operativa.

Los modelos implementados para el estudio se analizaron por medio de los parámetros integrados en cada uno; a raíz de esto, la tendencia de los cuatro modelos corresponde a una capacidad moderada o alta de predicción en relación con los valores reales del sistema. La dispersión de los modelos presenta cercanía a los valores reales, siendo el modelo SARIMA el más

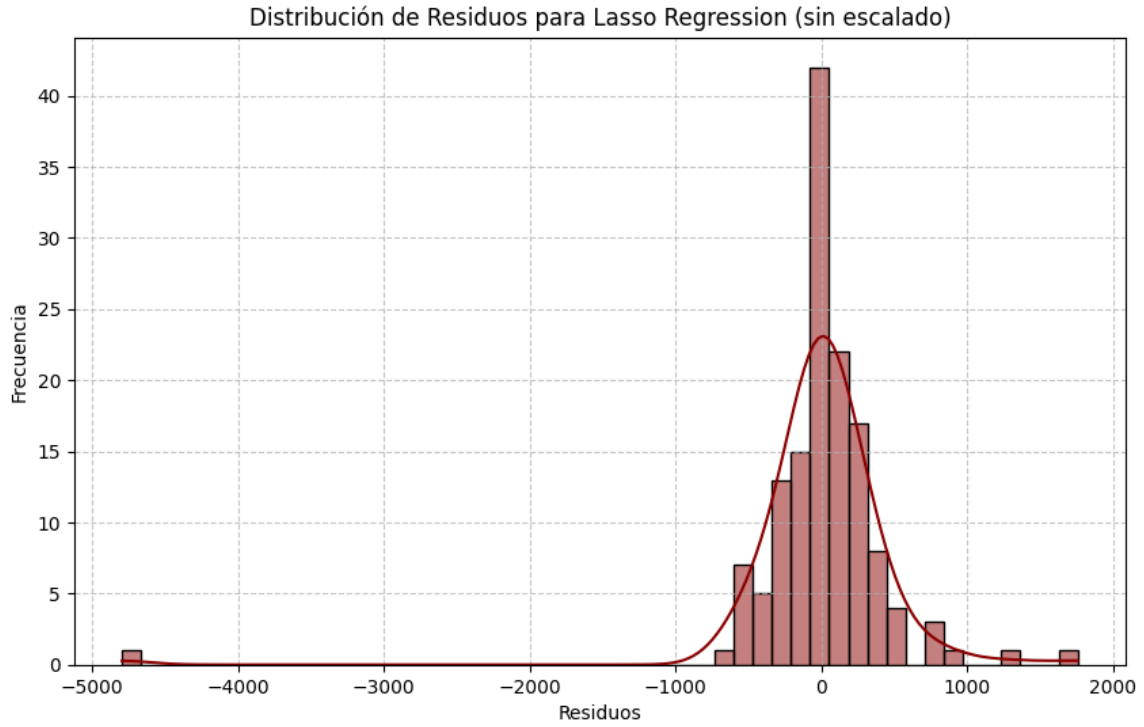
aproximado a los datos originales. Esto se puede visualizar de la siguiente manera:



### Ilustración 34. Mejor dispersión - SARIMA

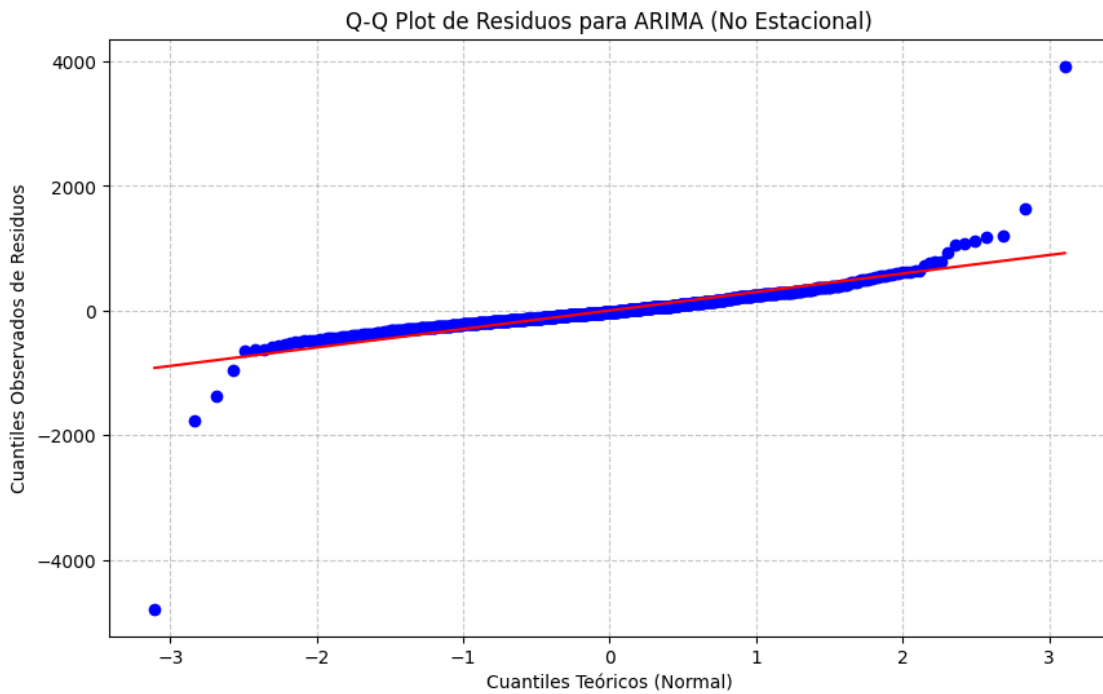
Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

Considerando el valor residual de los modelos, se observa una incidencia enfocada en cero, de los cuales el modelo de Lasso presenta la menor incidencia; se observa que los histogramas correspondientes a los valores residuales presentan una distribución normal leptocúrtica de alto grado y poseen colas considerablemente largas en ambos extremos. La leptocurtosis de los histogramas, a pesar de estar presente en todos los modelos, se presenta con un mayor grado en los datos correspondientes a SARIMA y con menor grado en Lasso. De igual manera se menciona que el gráfico Q-Q de los modelos presenta patrones similares, siendo el de ARIMA el que se aproxima más a la línea con valores, exceptuando los datos correspondientes a valores atípicos en los extremos. Se ejemplifica de la siguiente manera:



### Ilustración 35. Menor grado leptocúrtico - Lasso

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab



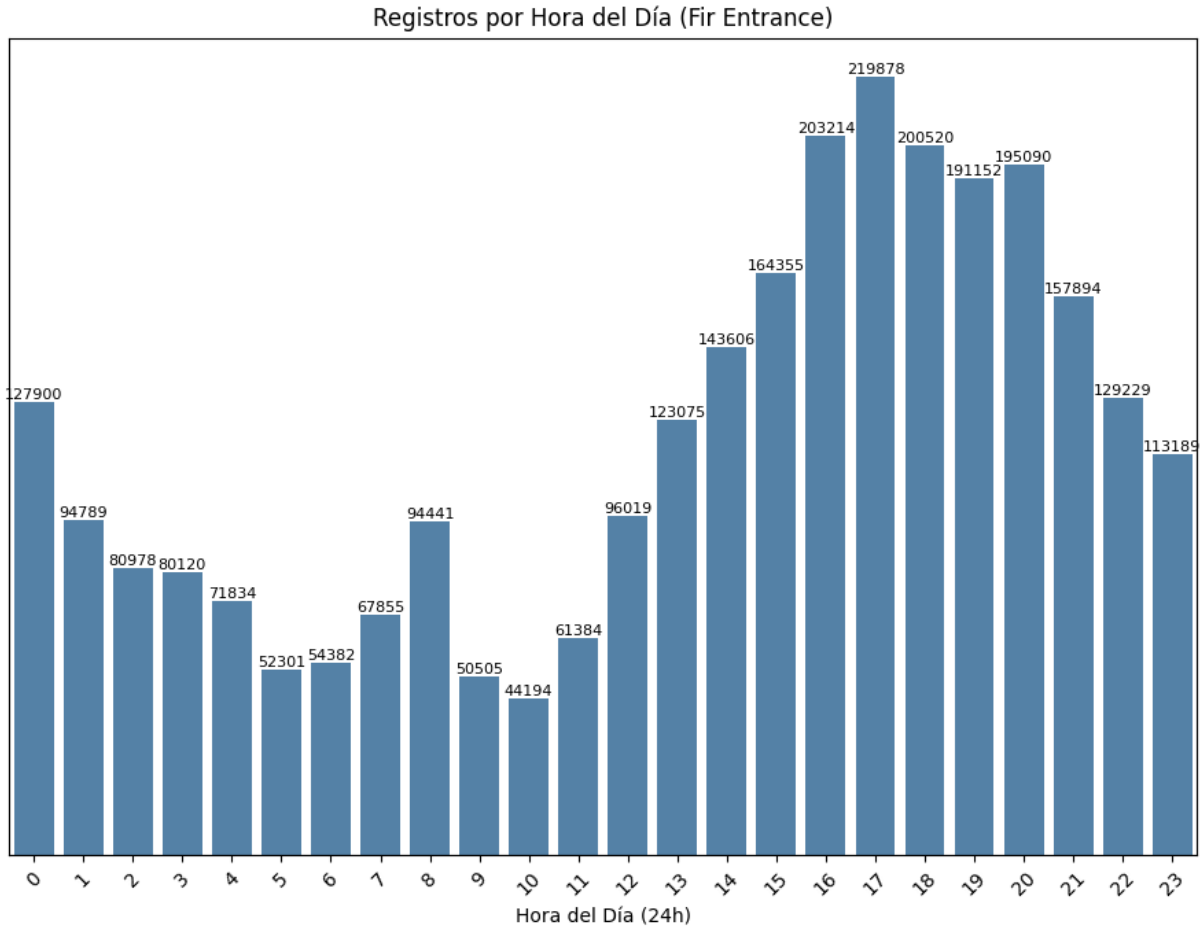
### Ilustración 36. Mejor ajuste Q-Q - ARIMA

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

#### 4.4.3 DISCUSIÓN DE HALLAZGOS

Para evaluar la capacidad predictiva de los modelos es necesario realizar la comparación respectiva sobre las métricas de error estándar (MAE), Error Cuadrático Medio (RMSE) y los resultados R-cuadrado (en caso de ser una regresión) y AIC (en caso de ser un modelo de series de tiempo). Esto permitirá tener un mayor nivel de comprensión respecto a la precisión de los modelos ante las predicciones, las cuales utilizarán valores reales para su entrenamiento. En base a esto, el modelo SARIMA presenta el mejor rendimiento combinando mejores resultados de MAE y AIC, y teniendo el segundo mejor RMSE de los modelos implementados, evidenciando una alta capacidad de aproximación con relación a los datos reales y las consideraciones de la estacionalidad de los datos.

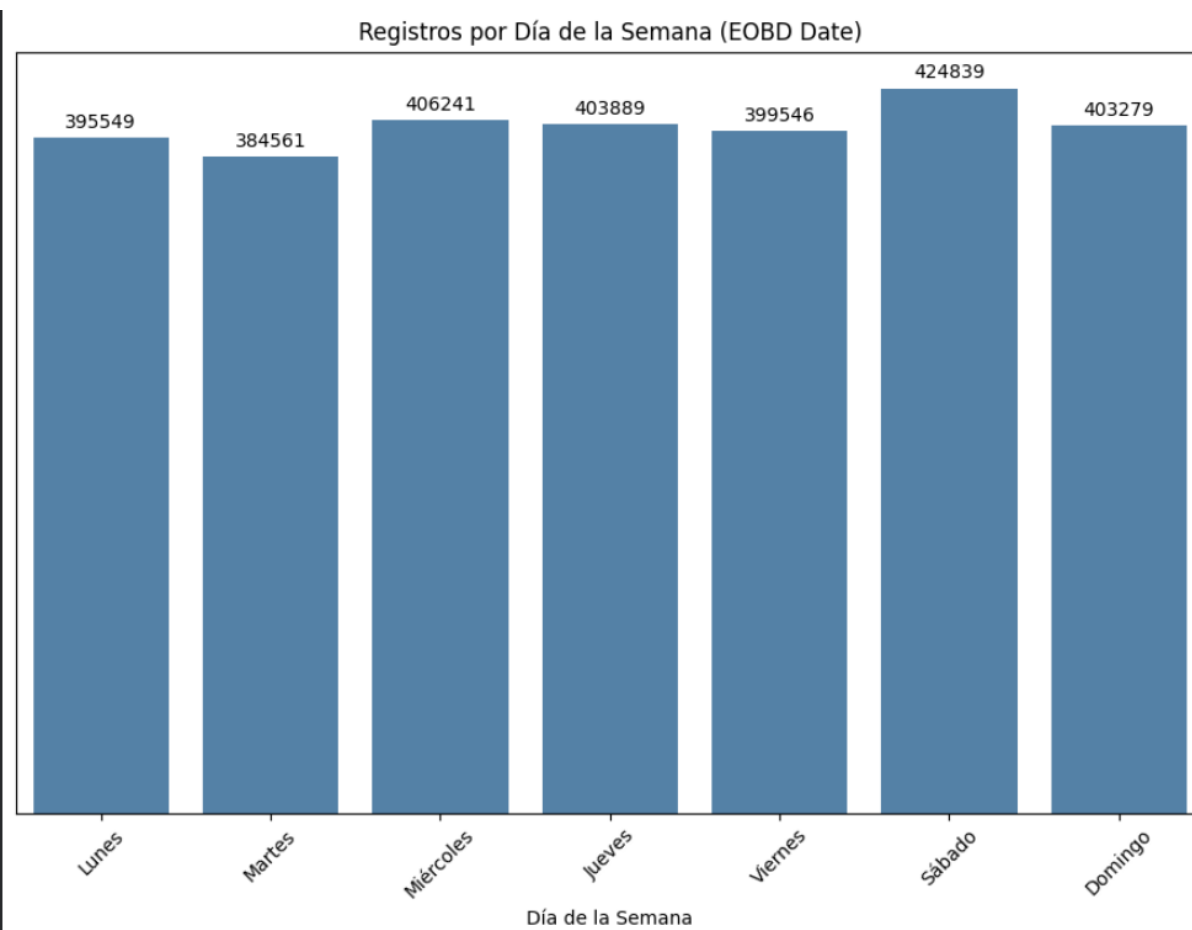
Debido a esto, la implementación del modelo SARIMA se presenta como la mejor alternativa para realizar las predicciones de las operaciones aeronáuticas. Mediante esto se espera realizar un análisis no solo de la incidencia anual, sino del detalle correspondiente al desglose por semana y hora, profundizando de esta manera en información valiosa para las estrategias.



**Ilustración 37. Registros por hora**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

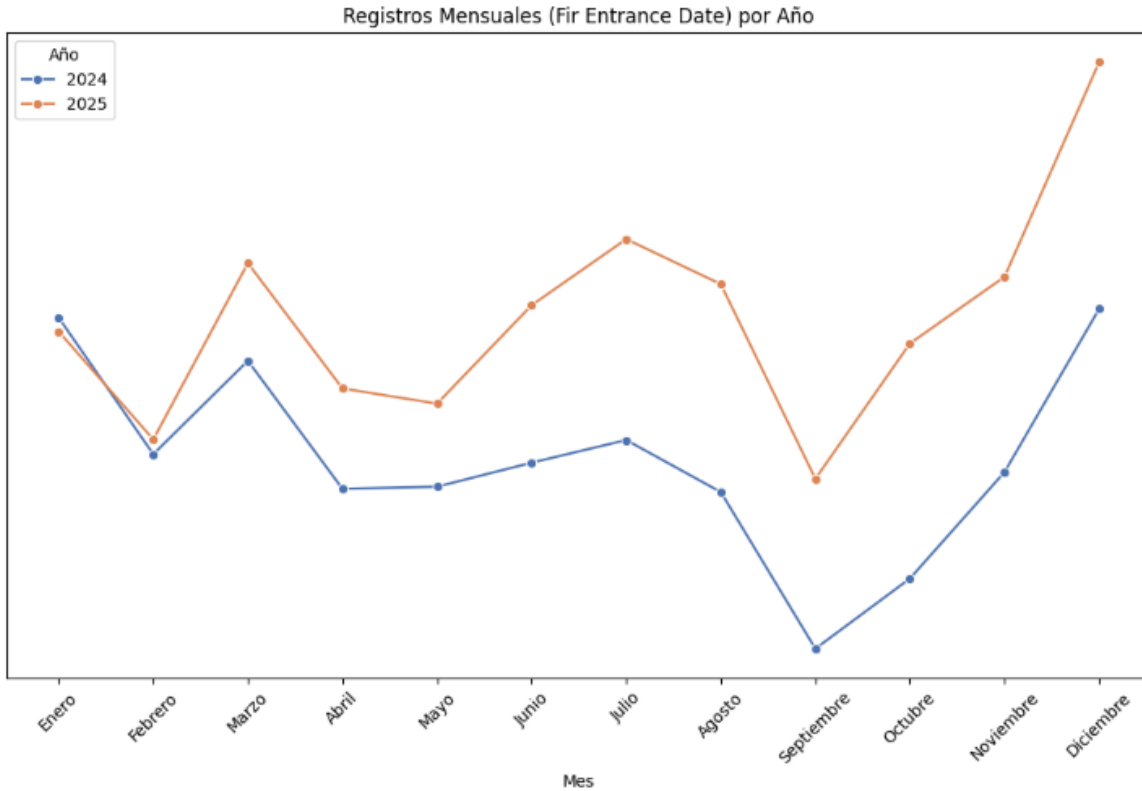
Se observa una tendencia respecto al periodo entre las 15 y las 20 horas del día, donde se presenta la mayor parte de las gestiones de vuelo; durante este periodo se estipula tener la mayor incidencia de la demanda. Al observar, inferimos que, al requerir un mayor nivel de recursos para operar durante este periodo, la carga laboral será significativamente mayor. Al desglosar los días de la semana, a diferencia de las horas, se observa una menor variación, lo que representa un rango considerablemente más cerrado donde los picos se presentan el sábado y los miércoles, jueves y domingo se encuentran relativamente similares.



**Ilustración 38. Registros por día de semana**

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

Al realizar una comparación de los periodos correspondientes a los meses, se observa un patrón constante y creciente respecto a los datos, siendo la mitad y el final de año los meses con mayor demanda del servicio. Se puede notar la tendencia existente, la cual presenta patrones extremadamente similares para ambos periodos, por lo que la estacionalidad y los patrones dentro del modelo son una parte vital de la interpretación. Se detalla de la siguiente manera:



### Ilustración 39. Tendencias anuales

Fuente: Elaboración propia mediante Google Colab

Concluyendo, los resultados indican que la implementación de SARIMA presenta el mayor beneficio para la predicción de operaciones aeronáuticas debido a su estabilidad y precisión al momento de manejar estructuras complejas que tienen un alto grado de estacionalidad y patrones.

#### 4.4.4 LIMITACIONES

De acuerdo con la comparación de los modelos, los resultados demuestran cómo los modelos de series temporales tienen una relación clave en el rendimiento de las predicciones. Los modelos SARIMA y ARIMA presentan el mejor desglose de los datos al considerar factores no integrados dentro de las relaciones; los demás modelos presentan rendimientos considerables, sin embargo, se ven limitados por la data utilizada para la interpretación. Entre las limitaciones, la falta de linealidad, falta de consideración ante la estacionalidad y la necesidad de un mayor volumen de los datos para procesar de mejor manera los resultados provocan que modelos lineales o de aprendizaje tengan dificultades para adaptarse. Debido a esto se toma en consideración que las proyecciones pueden sufrir de suavizaciones artificiales.

Es importante notar que para las predicciones realizadas para el periodo 2026 se formularon únicamente durante los primeros 30 días, esto se debe a que la integración de dos periodos no representa suficientes datos para predicciones a largo plazo y esto causa que las predicciones sean suavizadas de manera brusca y periódica debido a lo que se conoce como “predicción hacia la media”; este concepto se da cuando los datos proporcionados no permiten que los modelos realicen predicciones a largo plazo, por lo que se toma consideración de los periodos cercanos y se realizan predicciones que tienden a acercarse a la media.

Como limitante, los modelos se vieron afectados principalmente por la recolección de datos para los periodos selectos, lo que impactó debido a la necesidad de considerables recursos para el procesamiento de estas y su posterior integración (alimentando a los modelos); los modelos como SARIMA y ARIMA si bien son excelentes en las series de tiempo requieren de mayor información para realizar proyecciones prolongadas mientras que otros modelos como XGBoost se ven afectados de manera drástica debido a la necesidad de data para las iteraciones realiza por un árbol de decisiones. De igual manera se detallan limitantes respecto a los datos debido a la falta de consideración de los factores exógenos como lo son las condiciones meteorológicas, anomalías o demás variables que tienen efecto dentro de los rubros.

Finalmente, se identifican limitaciones relacionadas a la multicolinealidad existente entre las variables Minutes flown y Miles flown, lo que indica una dependencia entre ambas debido al concepto que estas tratan; se menciona que a pesar de la correlación existente, las diferencias estadísticas presentadas y la consideración de la independencia de estas respecto a los valores que representa permite una apertura para pruebas relacionadas al estudio de únicamente una de esas variables, lo que podría brindar resultados diferentes.

## **4.5 SÍNTESIS DE HALLAZGOS**

### **4.5.1 PRINCIPALES HALLAZGOS**

El análisis comparativo de los modelos para la proyección de operaciones de vuelo en CENAMER identifica hallazgos donde existe un predominio de los modelos de series de tiempo; los modelos SARIMA y ARIMA muestran el mejor rendimiento general, obteniendo un AIC de 10,219.97 y 10,511.91 respectivamente. En el caso de la planificación estratégica de operaciones, el resultado del estudio indica que los modelos temporales son considerados como confiables; mediante el uso de data histórica se puede observar un comportamiento marcado para las tendencias

y estacionalidad, lo que proporciona elementos que se consideran como relevantes para integrarlos a un modelo como lo son las series de tiempo.

El manejo de los valores atípicos y la variabilidad en las operaciones es uno de los factores más considerables para el estudio, ya que, si bien afectan los promedios existentes y la distribución de los datos, funcionan para tener un panorama completo de las tendencias y evitar un sesgo artificial al momento de crear el conjunto de datos. El modelo de Robust Regression presenta el mejor manejo de esto, sin embargo, los resultados de este son carentes en comparación a los modelos temporales, por lo que se sugiere que el manejo de valores anormales o atípicos previo a la implementación del modelo; debe tomarse en consideración que estos valores representan picos inusuales de tráfico o eventos inesperados, lo cual puede ayudar a la presentar un modelo más sólido debido a la integración de situaciones reales.

Comparando los modelos, el alto rendimiento de los modelos temporales evidencia que las características estacionales y temporales se tornan en un factor indispensable en las predicciones. Por lo tanto, las variables derivadas del tiempo y operaciones permiten capturar el movimiento y la dinámica del tráfico, demostrando la calidad que pueden llegar a tener en la precisión de los modelos implementados. Los modelos de aprendizaje automático pueden ser un complemento importante en la predicción de operaciones de vuelo en caso de tener data suficiente; al integrar estos sería necesario parametrizar y alimentarlos de manera apropiada para obtener mejores resultados, lo cual dificulta su uso, pero presenta una posibilidad de alto rendimiento para estudios futuros.

Se evidencian las limitaciones que representan los modelos lineales debido a la estructura de estos; es necesario considerar que la autocorrelación existente, al igual que las tendencias, tiene un efecto considerable en el desempeño de los modelos y la predicción dinámica diaria de esto. Esto indica la necesidad de considerar variables externas para reducir la rigidez del modelo y obtener resultados apropiados, lo cual carecen los modelos lineales debido a la falta de “sensibilidad” necesaria para procesar estos conceptos adicionales.

La comparación de los modelos resume la implementación de estos como una oportunidad estratégica para la aplicación de ellos dentro de los procesos operativos del centro de control con el objetivo de gestionar la carga de trabajo y utilizar los recursos de manera óptima. Los modelos predictivos pueden utilizarse para anticipar el nivel de tránsito aéreo en las operaciones diarias, lo

que tiene efecto directo en la planificación del horario del personal, vacaciones, cursos recurrentes de control de tránsito aéreo, sectorización del espacio aéreo y la gestión de la carga de los controladores. Las proyecciones de operaciones de vuelo se convierten en una herramienta a utilizar para mejorar la distribución de recursos, así como mitigar riesgos de sobrecarga y fatiga por medio de la toma de decisiones respaldada por datos.

#### 4.5.2 IMPLICACIONES

Tras el análisis de los diferentes modelos de predicción, se han considerado las contribuciones al campo de estudio y resolución de problemas mediante la integración de estos en la gestión de operaciones con enfoque en el aspecto laboral y el bienestar de los controladores. La ventaja estratégica de contar con una proyección anticipada de operaciones de vuelo es que permite estimar con mayor certeza la demanda con el objetivo de facilitar la planificación de horarios, sectorizaciones dinámicas y estrategias para evitar la congestión del tránsito y el desequilibrio laboral al atender la demanda.

Por esta razón, los modelos predictivos son necesarios para la triangulación existente entre la carga cognitiva de los controladores de tránsito aéreo, el volumen del tránsito y el nivel de atención, lo que permite el desarrollo de medidas y planes de acción preventivos para apoyar la seguridad operacional.

El resultado de los modelos y herramientas de predicción apoya el proceso de las sectorizaciones dinámicas del espacio aéreo para anticiparse a picos altos de tráfico o la reducción de este, facilitando la toma de decisiones sobre la apertura o unificación de sectores para evitar la saturación en las operaciones o subutilización de recursos. En este sentido, los modelos predictivos son un instrumento que apoya la eficiencia en la gestión del tránsito aéreo.

Otra implicación que corresponde a la resolución de problemas es la posibilidad de combinar diferentes enfoques de los modelos para fortalecer la capacidad de predicción. En los hallazgos encontrados, se evidencia que los modelos lineales tienen una alta precisión cuando se toman en cuenta variables informativas que ayudan al modelo a entender las relaciones que existen en el conjunto de datos, mientras que los modelos de aprendizaje automatizado se adaptan mejor a capturar patrones que no sean lineales. La implementación de un enfoque híbrido podría resultar en una mayor robustez de las predicciones, tomando en consideración las ventajas y métodos analíticos requeridos para obtener mayor confianza y aplicabilidad.

Para finalizar, las contribuciones del uso de estos modelos se podrían reflejar en el beneficio de los sistemas de apoyo para la toma de decisiones (DSS) dentro de las áreas que apoyan el centro de control. La oportunidad de proporcionar proyecciones del tráfico aéreo ayudaría a la planificación de los recursos con los que se dispone, así como a la evaluación de escenarios no previstos y gestión de cursos de capacitación para los controladores. El uso de la analítica predictiva de datos no solo se basa en conocer una predicción futura de las operaciones, sino que también apoya los procesos estratégicos de planificación y gestión del tránsito aéreo.

#### 4.5.3 TRANSICIÓN AL CAPÍTULO V

De acuerdo con los resultados obtenidos de los diversos modelos de predicción y herramientas de análisis estadísticos, se permite transformar resultados e indicadores matemáticos en hallazgos que se aplican al contexto y rubro del control de tránsito aéreo. El rendimiento obtenido de los diferentes enfoques, como ser los modelos de regresión lineal, modelos de aprendizaje automático y modelos de series temporales, se da a conocer como la selección de variables y parámetros considerados influye de manera directa en la capacidad de los diferentes modelos para explicar el comportamiento y la dinámica del tránsito aéreo.

En este sentido, el análisis cuantitativo no solo es una evaluación de qué tan preciso es para predecir cada modelo, sino que también ayuda a identificar patrones importantes en las operaciones de vuelo. Por lo tanto, los resultados indican que la base analítica que sustenta las conclusiones de esta investigación se orienta a comprender cómo los diferentes modelos y herramientas de predicción pueden ser una ventaja competitiva y apoyar la planificación en las operaciones con respecto al proceso de toma de decisiones en un centro de control de área.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

1. El análisis de los datos históricos pertinentes a los años 2024-2025 ha permitido identificar tendencias y patrones diferenciados según el sector utilizado, evidenciando un mayor flujo y concentración de operaciones aéreas en los sectores continentales, en comparación con los sectores oceánicos que presentan menor incidencia, lo que genera valores atípicos en la distribución estadística. Este hallazgo valida la percepción de una distribución no homogénea de la carga operacional, lo que respalda la necesidad de optimizar el uso de parámetros de sectorización. Por ende, el estudio cumple el objetivo de brindar una base cuantitativa y metodológica para apoyar el proceso de toma de decisiones y mejorar la asignación de recursos ATS para reducir ineficiencias en las operaciones.

2. Mediante el uso de métricas como RMSE, MAE, R-cuadrado ajustado y AIC, se determinó que los modelos SARIMA y ARIMA (funcionando como modelos predictivos) obtuvieron el mejor resultado en la proyección del tráfico aéreo. Evidenciando que el uso de dichos modelos es adecuado para capturar la estacionalidad y los parámetros de las operaciones aéreas, cumpliendo el objetivo de elaborar un modelo confiable para utilizarse como una herramienta predictiva para anticipar la demanda y apoyar la planificación estratégica.

3. Las simulaciones, basadas en el modelo predictivo, demuestran una mejora sustancial de la carga operativa y uso de recursos asociada con la variabilidad de la demanda; los resultados de la implementación del ajuste contribuyen a un beneficio económico, laboral y reducen saturación operacional, cumpliendo así con el objetivo de evidenciar el efecto positivo medible en las gestiones ATS.

Observando lo detallado en la tabla 25, observamos una reducción diaria de 16,000 Lempiras respecto a la subutilización y el punto óptimo de trabajo; de igual manera se observa una considerable reducción de operaciones donde la fatiga es extrema debido a laborar en niveles teóricos.

**Tabla 25. Hipotético para ejemplificación**

Tipo	Capacidad por sector	Carga	Fatiga	Sectores abiertos	Personal	Costo
Subutilizado	67	Media	Baja	9	18	72,000 Lps
Óptimo	83	Alta	Moderada	7	14	56,000 Lps
Teórico	100	Muy alta	Muy alta	6	12	48,000 Lps

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el uso de los modelos predictivos para el desarrollo de planificación dinámica en la asignación de los controladores, considerando que la persona se deba distribuir de acuerdo con la demanda existente y teniendo presente los planes de respaldo en caso de que, por factores exógenos, se presenten diferentes situaciones. Este enfoque permitirá evitar la subutilización de personal, lo que representa un beneficio económico y de la misma manera permitirá prever, en caso de saturación, la reducción de la fatiga y el riesgo de los controladores.

2. Se recomienda la integración de las herramientas y modelos dentro de los procesos de planificación; esta integración permitirá mejorar la capacidad de anticipar cambios en la demanda o sustentar decisiones estratégicas relacionadas con las asignaciones de recursos o uso de sectores. La implementación de esta, considerando que el modelo ATFM genera documentos Excel, puede integrarse de manera fácil relacionada con su uso para obtener información actualizada de las predicciones y poder realizar los ajustes necesarios a los modelos seleccionados.

3. Se recomienda la ampliación o reducción de los sectores según la demanda; la asignación de personal debe considerar los recursos de la institución, por lo que es necesario incorporar predicciones, data histórica y decisiones estratégicas para tener un manejo holístico de las situaciones. Se deberán tener en cuenta factores exógenos que afecten las operaciones como condiciones meteorológicas, eventos regionales y estacionalidad del tráfico aéreo. Este enfoque, en conjunto con la integración de herramientas analíticas, permitirá tener una mejor precisión predictiva y fortalecer el análisis de patrones para la optimización del uso de los sectores.

## CAPÍTULO VI. APLICABILIDAD

### INTRODUCCIÓN

El siguiente apartado consiste en la aplicación de un proyecto en la institución para promover el uso de la analítica de datos para la planificación estratégica en el centro de control de CENAMER. Mediante la implementación de modelos predictivos como parte de un sistema integrado que permita realizar las predicciones a futuro para identificar acontecimientos que requieran atención y así tomar acciones para balancear cargas de trabajo como la distribución de los recursos disponibles es parte de la finalidad de esta sección.

La taxonomía de la propuesta no solo involucra en la entrega de un proyecto terminado, sino que busca que sea sostenible en el tiempo en aras de la mejora continua. Por esta razón, se elabora un plan íntegro que permita dar continuidad a las diferentes fases y al desarrollo de la propuesta para que forme parte del proceso de toma de decisiones en la gestión estratégica de las operaciones que maneja CENAMER. En virtud de lo antecedente, se emplea la propuesta de aplicabilidad en las siguientes secciones.

#### 6.1 NOMBRE DE LA PROPUESTA

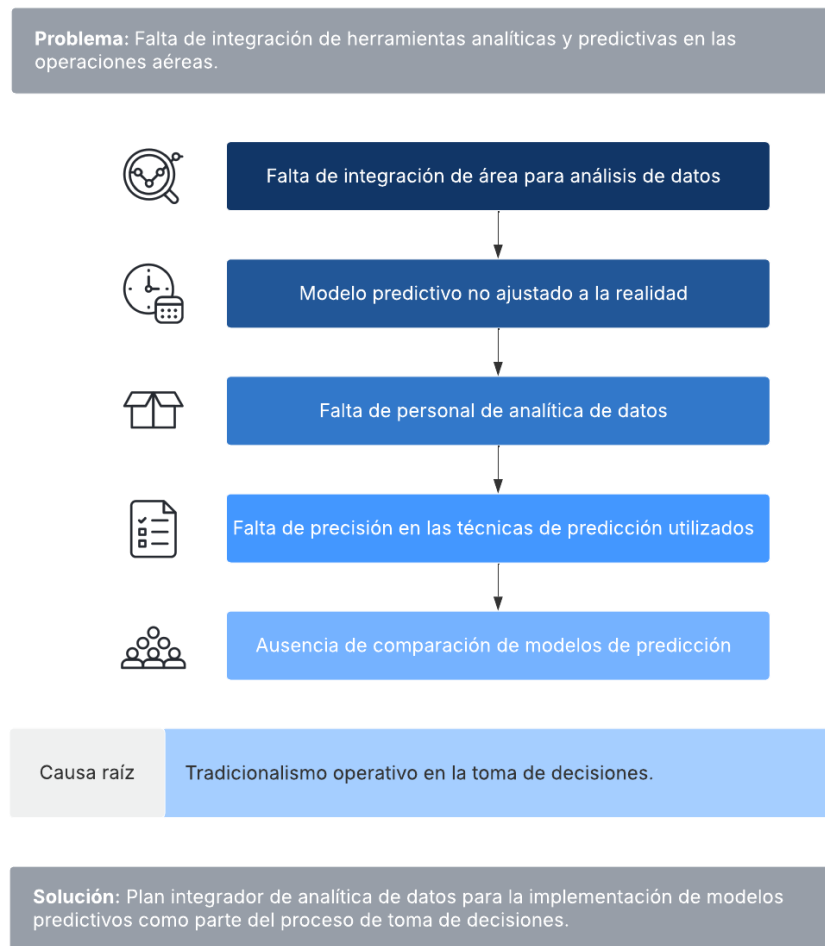
Basado en el desarrollo de la investigación y tomando en cuenta el funcionamiento de modelos predictivos para la gestión de la demanda del tránsito, se considera el siguiente nombre de la propuesta: **Plan Estratégico para la Implementación del Sistema Predictivo Basado en el Algoritmo SARIMA para la Optimización de la Distribución de la Capacidad Sectorial en CENAMER.**

#### 6.2 JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

La presente propuesta se fundamenta en la necesidad de optimización sectorial del espacio aéreo relacionada con los hallazgos del capítulo 4, donde se destacan los modelos de series temporales que mejor se ajustan para el análisis de la estacionalidad de los datos. De acuerdo con los resultados y rendimientos, el modelo SARIMA se propone como la mejor alternativa con un RMSE de 389.76 que se traduce en el mejor balance entre precisión y ajuste de los datos; de igual manera, el MAE de 198.35 y el AIC de 10,219.97 funcionan como fundamento para la selección del modelo SARIMA.

Los modelos predictivos representan un componente importante para la gestión de tránsito

aéreo, donde se refleja en el estudio de Aguilar Valarezo (2024), mediante predicciones de vuelos en espacio aéreo español, evidenció la capacidad de estos para eliminar incongruencias en las predicciones de rutas de vuelo con un alcance aproximado del 86% y un 60% de rutas completas en la estimación a través del volumen de núcleos y volumen de tráfico aéreo.



### Ilustración 40. 5 porqués para la implementación de la propuesta

Fuente: Elaboración propia

El modelo SARIMA se evidenció como aquel con mejor capacidad predictiva respecto a las pruebas realizadas, por lo que se considera como apropiado que este sea utilizado para proyectar las operaciones de las gestiones de CENAMER, permitiendo tener una mejor medida de los picos operacionales.

Se hace referencia a las teorías de sustento del capítulo 2 que forman las bases de la investigación y tienen relación directa con la aplicabilidad de la propuesta. En un sistema donde la

Demanda y Oferta no pueden ser libremente ajustadas por el tipo de rubro como el control de tránsito aéreo, es necesario certificar al personal para realizar las funciones operativas y llevar un tiempo prudencial para ajustarse a la posición. Se debe apuntar a los ajustes estratégicos para atender la demanda de tráfico aéreo. En este sentido, la implementación se basa en apoyar a los tomadores de decisiones en conocer las operaciones futuras mediante modelos predictivos para tener mayor certeza.

En el contexto de la teoría de colas, es relevante mencionar que, dentro del comportamiento del tránsito aéreo, se depende en gran manera de la tasa de llegada (demanda) y la tasa de servicio (oferta); dentro de este sistema, similar a todo mercado, es necesario comprender que la saturación ( $\rho > 1$ ) representa colas sobre las gestiones, de esta manera aumentando la espera y creando una sobrecarga para los empleados. Basado en esto, el beneficio de operar en un rango óptimo ( $\rho < 0.85$ ) permite mantener la estabilidad operacional, al igual que reducir la saturación de los servicios y optimizar la distribución.

Mediante el uso del modelo SARIMA, se permite realizar el cálculo de la tasa de llegada y prepararse mediante una sectorización dinámica para aumentar la tasa de servicio, permitiendo proactividad en la asignación en vez de una reacción a las instancias. Ejemplificando, la reducción de la carga cognitiva del personal CTA en un modelo que predice un incremento del 10%, lo cual permite que la distribución de sectores se planifique a manera que se evite la superación del umbral crítico, hace que el riesgo, fatiga y errores operacionales disminuyan; la justificación de este modelo relacionado a la teoría tiene principio en la utilización de recursos y la creación de sistemas más eficientes debido a la rigidez de la oferta debido a las características del rubro.

La Optimización de Redes se orienta a mejorar la distribución de recursos y hacer más eficientes los procesos en la planificación operativa para atender la demanda del tráfico aéreo mediante la sectorización del espacio aéreo e identificar la cantidad necesaria de personal para cubrir las posiciones de control. Mientras que la teoría de la Cuarta Revolución Industrial representa el puente para aprovechar las bondades de las herramientas de análisis de datos y la contribución a la automatización de actividades en CENAMER.

### **6.3 ALCANCE DE LA PROPUESTA**

El alcance de la presente investigación se delimita a implementar un plan estratégico del modelo SARIMA de series de tiempo para predecir la demanda de tráfico aéreo para el personal

de la coordinación ATFM, proceso de apoyo al centro de control de área CENAMER para la gestión del tránsito aéreo durante el segundo semestre del 2026. La propuesta no abarca áreas de ventas, logística ni otro proceso interno o externo de la institución.

Implementar el modelo predictivo SARIMA basado en series de tiempo para la predicción de tráfico aéreo en los sectores de control de CENAMER (S) mediante el uso de datos operacionales históricos del 2022-2025 (A) para lograr un error de predicción menor al 7% (M) para un periodo de 3 meses (T) con el fin de mejorar la planificación operativa bajo criterios de seguridad aeronáutica (R).

Integrar el modelo predictivo SARIMA en los procesos operativos de CENAMER (S) para la evaluación de capacidad enfocada a la reducción en al menos 10% (M) de picos de saturación sectorial a través del uso de datos históricos y resultados proyectados (A) con la finalidad de optimizar los recursos en la asignación de sectores de control (R) durante una etapa de 3 meses (T) posterior a la implementación y validación del modelo.

Capacitar al 100% del personal de la coordinación ATFM de CENAMER en la aplicación, interpretación y uso del modelo predictivo implementado (S) a través de un programa estructurado de 20 horas formativas en teoría y evaluación práctica con requisito de calificación mínima de aprobación de 85% (M) a través de planificación horaria destinada a la capacitación, integrando casos de estudio y ejercicios con datos operativos (A) con la finalidad de garantizar la correcta ejecución del modelo para la gestión del tráfico aéreo (R) en un periodo de 1 mes (T).

## **6.4 DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO**

### **6.4.1 DESCRIPCIÓN**

Para la propuesta de implementación, se basa en la creación de un Plan Estratégico para la aplicación de un modelo predictivo que se orienta a apoyar la gestión de decisiones sobre el tráfico aéreo en CENAMER. El plan se desarrolla mediante el uso de modelos de series de tiempo, específicamente el modelo SARIMA, con el desarrollo del código estructurado en Google Colab donde el propósito es predecir operaciones certeras acerca de las operaciones aéreas.

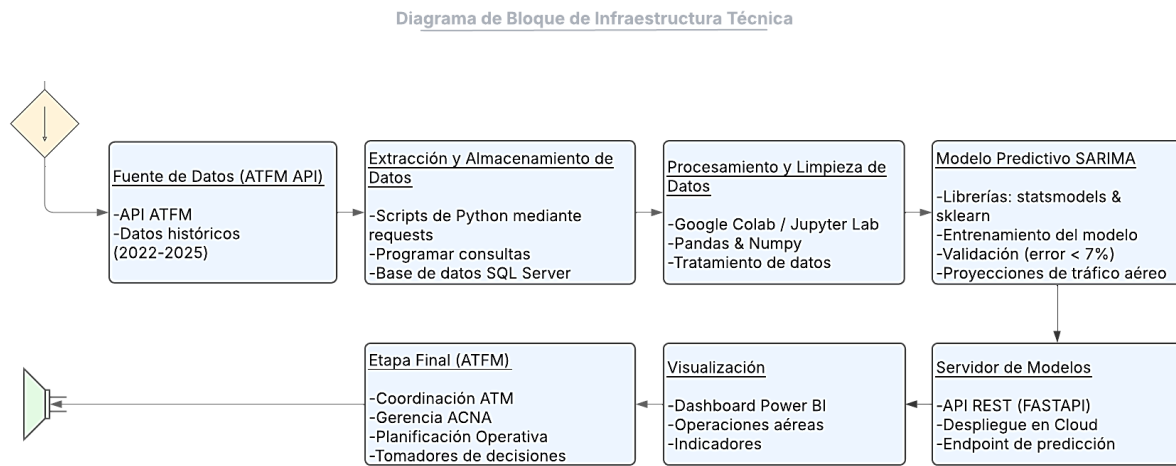
En base al punto de vista metodológico, la propuesta se basa en una estructura de fases vinculadas que respetan una secuencia lógica e integral. En primera instancia, se propone una planificación estratégica para definir lineamientos y normas, así como los objetivos del plan y el

alcance del modelo predictivo. Consecuentemente, se realiza una fase donde se integra la tecnología junto al análisis de datos en la cual se implementa el modelo SARIMA haciendo uso de datos de operaciones del pasado, permitiendo la validez técnica de las proyecciones.

Adicionalmente, se agrega una fase comunicativa para facilitar la interpretación de resultados e incorporación en la gestión de decisiones. La propuesta expone la incorporación de documentación para la mejora de procesos y así estandarizar actividades y pasos operativos en la información predictiva.

Desde el enfoque organizacional, se plantea el desarrollo de perfiles de puestos y funciones para definir las responsabilidades en la operación y ejecución del modelo predictivo, para garantizar la sostenibilidad en el tiempo. Así mismo, se elaboran planes de capacitación dirigidos al personal de la coordinación ATFM, orientados al uso e interpretación de resultados del modelo predictivo.

Para finalizar, se establecen modelos de implementación para describir los pasos, recursos y actividades necesarios para la ejecución del sistema y entorno predictivo en las operaciones de CENAMER. Por lo tanto, las estrategias permiten la incorporación tecnológica del modelo predictivo, así como también la integración efectiva del plan para la gestión del tránsito aéreo.



### Ilustración 41. Infraestructura técnica

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 40 resume el proceso de integrar la arquitectura mediante la secuencia de pasos iniciando en la ingesta de datos históricos de la API de ATFM. La extracción y el almacenamiento son el paso consiguiente para aplicar scripts de Python para realizar operaciones y programación de consultas en bases de datos SQL. Esto conlleva seguir la secuencia para el procesamiento y la limpieza mediante el uso de librerías Pandas y Numpy para el tratamiento de datos con el objetivo de implementar y validar el modelo predictivo SARIMA en servidores de la nube. Lo que conlleva integrar la visualización de resultados mediante Dashboards interactivos en Power BI para presentar a los agentes involucrados los hallazgos pertinentes a las operaciones aéreas.

#### 6.4.2 DESARROLLO

A continuación, se detalla cada uno de los entregables de la propuesta a fin de implementarse de forma inmediata para apoyar el proceso de toma de decisiones en la coordinación ATFM de CENAMER:

##### Plan Estratégico para Implementar Modelo Predictivo

En este apartado se define la hoja de ruta para adoptar y sostener el modelo predictivo en la gestión del tránsito aéreo mediante estructuración formal con formato institucional y se define de la siguiente manera:

- Evaluación y diagnóstico situacional de CENAMER en relación con la capacidad operativa de los sectores de control y el uso de datos en los procesos ATFM para la gestión del tránsito.
- Definición de los objetivos estratégicos orientados a la gestión del tránsito aéreo e identificación de las partes interesadas (analistas de datos, tomadores de decisiones, controladores aéreos, alta gerencia).
- Definición de indicadores (KPIs) basada en los tiempos de respuesta, precisión del modelo predictivo y la reducción de incertidumbre operativa.
- Hoja de ruta para la implementación (corto, mediano y largo plazo).
- Gestión de riesgos relacionados a la parte técnica y operativa de la organización.

##### Plan de Comunicación

La finalidad del siguiente plan se basa en la garantía para brindar la adopción del modelo predictivo mediante estrategias de comunicación en los procesos organizacionales. Se detallan a continuación:

- Estrategia de comunicación basada en los perfiles operativos, técnicos y directivos del área.
- Canales de comunicación como ser informes ejecutivos, dashboards y presentaciones interactivas.
- Diseño de reportes de resultados acerca del modelo predictivo.
- Plan de uso de analítica predictiva en ATFM
- Gestión de resistencia al cambio mediante identificación de obstáculos y barreras.

#### Implementación y desarrollo del Modelo Predictivo para el análisis de los datos

El entregable de esta sección tiene fundamento en el diseño y validación del modelo SARIMA para la predicción de operaciones de tráfico aéreo, que contiene el código documental estructurado, data set limpio, reporte de hallazgos y resultados que ya fueron desarrollados en el capítulo 4. El contenido se basa en lo siguiente:

- Recolección y limpieza de datos históricos de operaciones aéreas.
- EDA (Análisis exploratorio de los datos para mostrar estacionalidad, datos atípicos y tendencias).
- Modelo SARIMA desarrollado en Google Colab.
- Validación y comparación frente a otros modelos predictivos.
- Proyección de operaciones aéreas.
- Automatización del proceso de predicción.

#### Desarrollo de Perfiles de Puestos y Funciones

Se define la estructura de perfiles necesarios para la sostenibilidad del modelo en la organización mediante el manual de puestos y responsabilidades. Contiene los siguientes puestos:

- Roles clave: Analista de datos operacionales de ATFM, Especialista en modelos

predictivos y supervisor operativo para la planificación de turnos basado en los resultados.

- Descripción de las funciones, así como de las responsabilidades del equipo.
- Definición de las competencias técnicas y de análisis de datos (manejo de Python, herramientas de análisis de datos, herramientas de visualización de datos, estadística).
- Integración a la estructura organizacional.

#### Plan de Capacitación

Para garantizar el uso del modelo predictivo y la correcta adopción de este por parte del personal, se propone la capacitación con materiales y evaluación de aprendizaje mediante el siguiente contenido:

- Diseño para formulación de programas formativos en: Herramientas de analítica de datos, interpretación de modelos y resultados predictivos, así como la toma de decisiones para la gestión de las operaciones aéreas.
- Material y evaluaciones para el aprendizaje (casos prácticos de análisis como presentaciones interactivas).
- Cronograma de actividades y capacitación.

#### Guía de implementación operativa del modelo

El entregable final se basa en una guía operativa identificada como un plan de seguimiento para la puesta en marcha del modelo predictivo en el entorno operacional para la coordinación de ATFM en CENAMER. El contenido es el siguiente:

- Estrategia de implementación mediante pruebas piloto
- Definición del entorno y frecuencia de ejecución del modelo predictivo
- Integración para la toma de decisiones operativas del centro de control
- Plan de seguimiento y mejora continua
- Indicadores claves de desempeño

#### Revisión de estabilidad mensual para la Gestión de la Deriva del Modelo Predictivo

Para mantener la validación y sostenibilidad del modelo predictivo SARIMA a través del

tiempo, es indispensable incluir una fase de seguimiento continuo para captar desviaciones en el comportamiento de datos operacionales referentes a los patrones históricos que se han utilizado para el entrenamiento del modelo. Este apartado permite identificar variaciones de estacionalidad, fluctuaciones y cambios operacionales a futuro, fortaleciendo el ajuste del modelo a las nuevas condiciones del tráfico aéreo.

- Seguimiento mensual del rendimiento del modelo mediante análisis de métricas de error, comparando resultados presentes versus el comportamiento histórico.
- Consideración de la deriva del modelo al haber presencia de error residual promedio mensual que supere 2 desviaciones estándar referente a la media histórica.
- Reentrenamiento del modelo SARIMA con los datos operacionales más recientes.
- Recalibración de parámetros del modelo para ajustar a la dinámica actual del tráfico aéreo.
- Contrastación del modelo reentrenado mediante los mismos criterios (error de predicción < 7%).
- Gestión de versiones de modelos para garantizar la trazabilidad y el desempeño.
- Alertas al equipo de ATFM ante desviaciones importantes.
- Documentación sistemática de indicadores, ciclos de reentrenamiento del modelo y patrones en el tráfico aéreo.

## **6.5 MEDIDAS DE CONTROL**

A continuación, se exponen cinco indicadores clave junto a la ficha metodológica orientados a la propuesta de implementación del modelo predictivo en la toma de decisiones en la coordinación ATFM en CENAMER. Estos indicadores permiten evaluar la precisión y adopción operativa, midiendo los tiempos de respuesta y recursos para garantizar la sostenibilidad de la propuesta. Por lo tanto, se exponen los indicadores en las siguientes tablas:

**Tabla 26. Indicador de Precisión del Modelo**

Componente	Descripción / Qué Incluir
<b>Nombre del Indicador</b>	Precisión del modelo predictivo
<b>Código</b>	KPI-ATFM-001
<b>Tipo de indicador (E-R-I)</b>	Resultado
<b>Definición</b>	Mide el porcentaje de error absoluto entre valores reales y de predicción
<b>Propósito / Importancia Estratégica</b>	Evaluación de confiabilidad del modelo predictivo para la toma de decisiones operativas en CENAMER
<b>Fórmula de Cálculo</b>	$MAPE = (1/n) * \sum  (Real-Predicción) / Real  * 100$
<b>Componentes de la Fórmula</b>	Valor real, valor de predicción y número de observaciones
<b>Fuentes de Datos</b>	Aplicativo ATFM y salidas del modelo en Google Colab
<b>Unidad de Medida</b>	Porcentaje
<b>Frecuencia de Medición</b>	Mensual
<b>Responsable de la Medición</b>	Analista de Datos ATFM
<b>Responsable del resultado</b>	Coordinador ATFM
<b>Meta / Umbral</b>	Verde < 7%, Amarillo 7-15%, Rojo > 15%
<b>Formato de presentación</b>	Dashboard de tendencia
<b>Notas / Consideraciones</b>	Calidad de datos históricos
<b>Fecha de Creación / Revisión</b>	Marzo 2026

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 27. Indicador de Nivel de Adopción del Modelo Predictivo**

Componente	Descripción / Qué Incluir
<b>Nombre del Indicador</b>	Nivel de adopción del Modelo Predictivo
<b>Código</b>	KPI-ATFM-002
<b>Tipo de indicador (E-R-I)</b>	Impacto
<b>Definición</b>	Mide el porcentaje de decisiones operativas con el uso de información proveniente del modelo predictivo.
<b>Propósito / Importancia Estratégica</b>	Medir el grado de integración del modelo para la toma de decisiones.
<b>Fórmula de Cálculo</b>	$(Decisiones\ mediante\ el\ uso\ del\ modelo / Total\ decisiones\ operativas) * 100$
<b>Componentes de la Fórmula</b>	Decisiones basadas en el modelo y total de las decisiones
<b>Fuentes de Datos</b>	Reportes operativos y bitácoras ATFM
<b>Unidad de Medida</b>	Porcentaje
<b>Frecuencia de Medición</b>	Mensual
<b>Responsable de la Medición</b>	Analista de datos ATFM
<b>Responsable del resultado</b>	Dirección de los Servicios de Tránsito Aéreo
<b>Meta / Umbral</b>	Verde > 95%, Amarillo 85-95%, Rojo < 85%
<b>Formato de presentación</b>	Comparación mensual mediante tableros interactivos
<b>Notas / Consideraciones</b>	Integración cultural orientada en datos
<b>Fecha de Creación / Revisión</b>	Marzo 2026

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 28. Indicador de Tiempo de Respuesta para la Toma de Decisiones**

Componente	Descripción / Qué Incluir
<b>Nombre del Indicador</b>	Tiempo de Respuesta para la Gestión de Decisiones
<b>Código</b>	KPI-ATFM-003
<b>Tipo de indicador (E-R-I)</b>	Impacto
<b>Definición</b>	Mide el tiempo promedio necesario para tomar decisiones operativas frente a cambio en las operaciones aéreas
<b>Propósito / Importancia Estratégica</b>	Evaluación de la eficiencia operativa mediante uso del modelo predictivo
<b>Fórmula de Cálculo</b>	$\sum T / D$
<b>Componentes de la Fórmula</b>	T: Tiempo de tomar una decisión, D: Numero de decisiones
<b>Fuentes de Datos</b>	Registros ATFM y logs operativos
<b>Unidad de Medida</b>	Minutos
<b>Frecuencia de Medición</b>	Mensual
<b>Responsable de la Medición</b>	Coordinador ATFM
<b>Responsable del resultado</b>	Gerencia de Servicios de Tránsito Aéreo
<b>Meta / Umbral</b>	Verde < 60 min, Amarillo 80-60 min, Rojo > 80 min
<b>Formato de presentación</b>	Gráfico de líneas
<b>Notas / Consideraciones</b>	Comparación de un antes versus después de la implementación
<b>Fecha de Creación / Revisión</b>	Marzo 2026

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 29. Indicador de Plan de Capacitación**

Componente	Descripción / Qué Incluir
<b>Nombre del Indicador</b>	Ejecución del Plan de Capacitación
<b>Código</b>	KPI-ATFM-004
<b>Tipo de indicador (E-R-I)</b>	Resultado
<b>Definición</b>	Mide el porcentaje de personal capacitado
<b>Propósito / Importancia Estratégica</b>	Confirmar la preparación del personal para usar el modelo predictivo
<b>Fórmula de Cálculo</b>	(Personal capacitado / Total de personal en el área) * 100
<b>Componentes de la Fórmula</b>	Personas capacitadas, total de personas en la coordinación ATFM
<b>Fuentes de Datos</b>	Registro de capacitación
<b>Unidad de Medida</b>	Porcentaje
<b>Frecuencia de Medición</b>	Semestral
<b>Responsable de la Medición</b>	Coordinación de Instrucción
<b>Responsable del resultado</b>	Coordinador ATFM
<b>Meta / Umbral</b>	Verde 100%, Amarillo 70-99%, Rojo < 70%
<b>Formato de presentación</b>	Registro de cumplimiento
<b>Notas / Consideraciones</b>	Evaluaciones para el aprendizaje continuo
<b>Fecha de Creación / Revisión</b>	Marzo 2026

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 30. Indicador de Nivel de Progreso en la Planificación Operativa**

<b>Componente</b>	<b>Descripción / Qué Incluir</b>
<b>Nombre del Indicador</b>	Nivel de progreso en la Planificación Operativa
<b>Código</b>	KPI-ATFM-005
<b>Tipo de indicador (E-R-I)</b>	Impacto
<b>Definición</b>	Reducir de manera porcentual las desviaciones entre la planificación y operación real
<b>Propósito / Importancia Estratégica</b>	Medir impacto del modelo predictivo en la eficiencia de las operaciones aéreas
<b>Fórmula de Cálculo</b>	$[(DA-DP) / DA] * 100$
<b>Componentes de la Fórmula</b>	Desviaciones antiguas, con error histórico sin modelo. Desviaciones Posteriores con error del modelo.
<b>Fuentes de Datos</b>	Histórico operacional y resultados actuales del modelo.
<b>Unidad de Medida</b>	Porcentual
<b>Frecuencia de Medición</b>	Mensual
<b>Responsable de la Medición</b>	Analista de datos ATFM
<b>Responsable del resultado</b>	Gerencia de Servicios de Tránsito Aéreo
<b>Meta / Umbral</b>	Verde > 20% de mejora, Amarillo 10-20%, Rojo < 10%
<b>Formato de presentación</b>	Dashboard
<b>Notas / Consideraciones</b>	Medición en periodos equivalentes
<b>Fecha de Creación / Revisión</b>	Marzo 2026

Fuente: Elaboración propia

## 6.6 CRONOGRAMA DE IMPLEMENTACIÓN Y PRESUPUESTO

Para la implementación de la propuesta se ha estructurado un cronograma bajo un enfoque progresivo; la propuesta integrará la técnica PERT para la estimación del cronograma, que se representa de la siguiente manera:

**Tabla 31. Cronograma de implementación**

Fase	Actividad	Descripción	Responsable	O	M	P	PERT	Dependencias	Entregable
Diagnóstico	Recolección de datos	Extracción de tráfico, carga sectorial y horarios desde sistemas ATS	Coordinador ATFM	1	3	7	3.33	Ninguna	Datos en bruto
	Validación y limpieza	Tratamiento de outliers, datos faltantes y consistencia temporal	Analista de datos	2	3	5	3.17	Recolección	Datos procesados
	EDA	Análisis de patrones, estacionalidad, tendencias	Analista de datos	4	6	10	6.33	Limpieza	Informe EDA
Modelado	Desarrollo SARIMA	Modelado de series temporales con componente estacional	Científico de datos	4	5	8.25	5.38	EDA	Modelo SARIMA
	Regresión robusta y Lasso	Modelos alternativos para comparación y validación	Científico de datos	3	5	6	4.83	EDA	Modelos comparativos
	Validación	Evaluación con RMSE, MAE, R <sup>2</sup>	Científico de datos	1	2	5	2.33	Modelos	Reporte de desempeño
Implementación	Integración	Despliegue en entorno operativo (scripts o dashboards)	Analista de datos	4	5	8	5.33	Validación	Sistema integrado
	Preparación	Preparación de material de capacitación	Analista de datos	0.5	1	1.5	1.00	Sistema	Documentación para capacitación
	Capacitación	Entrenamiento al personal ATS en uso del modelo	Analista de datos	3	6	9	6.00	Integración	Personal capacitado
Evaluación	Piloto	Simulación operativa con datos reales	Analista de datos	4	6	10	6.33	Capacitación	Resultados piloto
	Retroalimentación	Documentación de modificaciones a realizar	Científico de datos	1	3	4	2.83	Pruebas piloto	Reporte de optimización
	Ajustes finales	Optimización y documentación	Científico de datos	4	5	6	5.00	Retroalimentación	Modelo ajustado
	Entrega	Evaluación y entrega de proyecto	Coordinador ATFM	0.5	1	1.25	0.96	Optimización	Reporte final

Fuente: Elaboración propia

- El diagnóstico, como la etapa inicial, consta del proceso de adquisición, limpieza y exploración de los datos. Esta sección cumple la función de estructurar las bases de la propuesta.
- La fase de modelado corresponde a la integración de modelos como SARIMA y comparativos; esto tiene la finalidad de evaluar métricas y realizar predicciones para la medición y comparación de resultados utilizando R-ajustado, MAE, RMSE, AIC para tener una comprensión matemática de los modelos utilizados. La integración de otros modelos junto al modelo SARIMA permite comparar y complementar los modelos mediante la observación de otros compuestos.
- La implementación consiste en la integración del modelo al sistema institucional, permitiendo su uso al personal no técnico mediante métricas, dashboards y demás. En esta fase es necesario capacitar al personal en el uso, variables y significado de las métricas para que se pueda implementar de manera efectiva.
- La evaluación, o fase final, corresponde a las pruebas y ajustes a realizarse para mejorar el modelo con relación a las necesidades del área. En esta fase se tiene en consideración la presentación de resultados al personal ejecutivo de la implementación, función y demás conceptos relevantes al uso, mantenimiento, costos y posibilidades relacionadas con los modelos.

Con una varianza general de 6.2951 y una desviación de 2.509 días, suponiendo una distribución normal de la duración, se pueden establecer intervalos de confianza en diferentes niveles de probabilidad. A una desviación estándar, lo cual representa el 68% de los datos, se obtiene un rango de (51.31, 54.35); para los intervalos de 95% y 99.7% (representando dos y tres desviaciones estándar) los rangos se ubican entre (49.79, 55.87) y (48.27, 57.39) respectivamente.

El cronograma para la implementación de modelos predictivos según la técnica de PERT estima los escenarios optimistas (32 días), más probables (51 días) y pesimistas (81 días); derivado de estos se obtiene un valor PERT de 52.83 días totales. En base a los parámetros establecidos, se calcula que la implementación por debajo de 50 días es casi imposible, con un 3.1% de probabilidad; la implementación en 52 días es de 29.1% de probabilidad, mientras que cualquier dato superior a 56 días es casi seguro el éxito de la implementación.

Considerando las posibilidades, se considera como objetivo la integración de este modelo en un periodo no superior a dos meses, lo que, según los cálculos de probabilidad, está prácticamente asegurado; en caso de no implementarlo en un periodo inferior a 58 días, se tendrá

que analizar la situación debido a que habría sucedido un error en la planificación o integración, lo que causa el atraso.

## 6.7 PRESUPUESTO E IMPACTO DE PRESUPUESTO

La implementación de un sistema predictivo nuevo requiere que la institución tenga un estimado del costo que implicaría la propuesta de lo descrito en el cronograma previo; para elaborar este presupuesto se utilizaron como base los estimados adquiridos al utilizar la técnica PERT, considerando las posibles variaciones al momento de incurrir en gastos. El presupuesto, debido a temas de confidencialidad, toma como supuestos los promedios de actividad, salarios y demás costos que puedan considerarse como relevantes para estimar el proyecto.

Este se desglosa en las secciones de VPN, ROI y TIR, las cuales nos darán una explicación del análisis financiero; los gastos de la implementación son los siguientes:

**Tabla 32. Inversión de implementación en Lempiras**

Categoría	Concepto	Presupuesto Anual			
		O	M	P	PERT
Personal	Analista de modelos y coordinación	420,000.00	455,000.00	476,000.00	452,666.67
	Especialista en modelos predictivos	392,000.00	413,000.00	434,000.00	413,000.00
Software y licencias	Licencia Microsoft Office	3,844.80	8,010.00	14,097.60	8,330.40
	Power BI Pro	-	8,971.20	15,379.20	8,544.00
Infraestructura cloud	Google Colab (Pro/Pro+)	-	6,401.59	32,033.59	9,606.66
Herramientas analíticas	Python (open source)	-	-	-	-
Capacitación	Formación ATS	3,000.00	5,000.00	10,000.00	5,500.00
Implementación	Integración sistema	12,000.00	16,000.00	20,000.00	16,000.00
Costos indirectos	Gestión del proyecto	7,500.00	12,500.00	16,000.00	12,250.00
Contingencia	Reserva de riesgo ( $\approx 10\%$ )	83,900.00	92,500.00	101,800.00	92,616.67
Servicios Básicos	Electricidad + Agua	900	900.00	900.00	900.00
<b>Total</b>		<b>923,144.80</b>	<b>1,018,282.79</b>	<b>1,120,210.39</b>	<b>1,019,414.39</b>

Fuente: Elaboración propia

La implementación de este modelo nos permite visualizar de manera detallada los gastos en los que se incurriría de manera mensual al integrar estos modelos dentro del proceso existente. La consideración optimista puede representar el caso inicial de la implementación debido a que tiene inversiones más sutiles en donde se van probando conceptos que den frutos a la institución; el caso pesimista por otro lado implicaría costos, licencias del tipo más caro, almacenamiento excedente a las necesidades y similares. Se considera, dentro del desglose de la tabla, la existencia de gastos únicos como lo son las capacitaciones, manejo de proyecto, reserva y similares.

Al considerar esta inversión y los gastos operativos, es necesario comprender que el

beneficio percibido no será un ingreso monetario directo, sino que, en ahorros en la gestión de personal y el control de operaciones, lo que lleva a beneficios económicos indirectos. El impacto financiero de la integración de este sistema es sustancial, por lo que es necesario tener consideraciones sobre el efecto de este en las áreas y la posibilidad de mejorar al reducir la ineficiencia de factores directos.

Al visualizar el efecto operacional de la propuesta, se puede notar un considerable cambio en la gestión del personal y la estructura institucional; este se ejemplifica de la siguiente manera:

**Tabla 33. Ejemplificación de efecto de propuesta**

		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo							
SIN MODELO	S1	110	95.65%	100	86.96%	80	69.57%	40	34.78%	160	139.13%	75	65.22%	90	78.26%
	S2	30	53.57%	48	85.71%	45	80.36%	35	62.50%	77	137.50%	60	107.14%	30	53.57%
	S3	85	94.44%	90	100.00%	73	81.11%	71	78.89%	96	106.67%	85	94.44%	85	94.44%
	S4	15	32.61%	13	28.26%	56	121.74%	55	119.57%	20	43.48%	11	23.91%	15	32.61%
	S5	0	0.00%	44	100.00%	34	77.27%	26	59.09%	63	143.18%	0	0.00%	0	0.00%
	S6	0	0.00%	42	67.74%	62	100.00%	0	0.00%	77	124.19%	43	69.35%	40	64.52%
	S7	60	70.59%	25	29.41%	65	76.47%	20	23.53%	95	111.76%	60	70.59%	60	70.59%
	S8	35	23.03%	38	25.00%	145	95.39%	3	1.97%	84	55.26%	45	29.61%	35	23.03%
	S9	5	5.00%	100	100.00%	50	50.00%	0	0.00%	78	78.00%	91	91.00%	15	15.00%
			340		500		610		250		750		470		370
CON MODELO	S1	96	83.48%	97	84.35%	93	80.87%	0	0.00%	115	100.00%	99	86.09%	94	81.74%
	S2	0	0.00%	44	78.57%	45	80.36%	0	0.00%	56	100.00%	0	0.00%	0	0.00%
	S3	0	0.00%	76	84.44%	74	82.22%	0	0.00%	90	100.00%	78	86.67%	0	0.00%
	S4	0	0.00%	0	0.00%	37	80.43%	0	0.00%	46	100.00%	0	0.00%	0	0.00%
	S5	34	77.27%	0	0.00%	36	81.82%	0	0.00%	44	100.00%	0	0.00%	0	0.00%
	S6	0	0.00%	0	0.00%	50	80.65%	51	82.26%	62	100.00%	0	0.00%	0	0.00%
	S7	0	0.00%	72	84.71%	70	82.35%	0	0.00%	85	100.00%	74	87.06%	69	81.18%
	S8	127	83.55%	129	84.87%	123	80.92%	119	78.29%	152	100.00%	132	86.84%	125	82.24%
	S9	83	83.00%	82	82.00%	82	82.00%	80	80.00%	100	100.00%	87	87.00%	82	82.00%
			340		500		610		250		750		470		370

Fuente: Elaboración propia

Al observar la ejemplificación, se tiene en consideración el beneficio que este sistema brindaría; en un mes típico, además de una distribución desproporcional, se presentan picos inesperados, interrupciones y demás, lo que ocasiona un nivel de ineficiencia o inactividad que se traduce en pérdidas monetarias. Considerando esto, el uso de modelos predictivos tiene como finalidad considerar ajustes sobre la distribución existente para prevenir la saturación o sobrecarga ocupacional y de esta manera utilizar el recurso humano de manera eficiente.

La reducción de los factores brindará beneficio monetario indirecto, el cual corresponde a la optimización del recurso personal y el ahorro de egresos operacionales; al reducir la saturación laboral, se disminuye considerablemente el desgaste, la necesidad de intervención de supervisores y a largo plazo, la rotación de personal (la cual implica ajuste de sueldo, pago de derechos laborales y demás gastos por entrenamiento del reemplazo) disminuirá. De similar manera, mediante la reducción de la utilización sectorial, se puede reasignar personal según las necesidades existentes; al considerar el personal subutilizado, la integración de este modelo permitirá movilizar recursos,

lo que permitirá atender las gestiones con mayor eficiencia y evitar gastos innecesarios.

Al analizar el VPN, con un horizonte de 4 años y una tasa 12%, se observa un beneficio considerable respecto a la propuesta; basado en la sumatoria de los diferentes ahorros (como lo son cantidad de persona, servicios básicos, periodos de ineficiencia o horas ociosas), se obtiene un VPN de Lps.2,046,023.54 una vez restado los costos de implementación la cual contempla gastos relacionados a operaciones, servicios, e costos iniciales del proyecto.

El ROI del proyecto, considerando la inversión de Lps.4,559,990.67, es de 1.91, marcando un beneficio considerable respecto a lo utilizado para la implementación; esta proyección se basa en el horizonte establecido de 4 años, donde el principal ahorro corresponde al ajuste estratégico del personal para evitar incurrir en gastos que se puedan prevenir. De igual manera es relevante mencionar que la inversión y el beneficio neto se ven afectados por la inversión anual constante requerida por la integración de nuevo personal.

Finalmente, la TIR del proyecto corresponde a aproximadamente 31.96%, lo que, considerando la tasa de 12%, representa una diferencia de 19.96% respecto a la inversión inicial. El punto de equilibrio, al considerar el flujo de Lps.2,174,927.36, es de aproximadamente 2.10 años.

Desde una perspectiva cualitativa, se puede mencionar que la integración de esta propuesta sería considerablemente beneficiosa al momento de la planificación y estructuración de cómo serán utilizados los sectores y el personal; al prevenir la sobrecarga y utilizar las predicciones se tiene un impacto humano y monetario, por lo que es importante considerar los beneficios que este puede traer no solo desde la economía sino la sostenibilidad del modelo actual.

Al tomar un enfoque preventivo y no reactivo, se mejora la probabilidad de realizar las gestiones con éxito y minimiza el error promedio existente; de igual manera, se debe considerar que al mejorar la calidad de vida de los empleados dentro de la institución, las operaciones y el ambiente laboral, mejorarán los resultados en las métricas existentes, lo que brindaría estabilidad a los procesos del área.

## 6.8 CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA PROPUESTA

	Capítulo I		Capítulo II		Capítulo III		Capítulo V	Capítulo VI	
Título Investigación	Objetivo General	Objetivos Específicos	Teorías/ Metodologías de sustento	Variables	Poblaciones	Técnicas	Conclusiones	Nombre de la propuesta	Objetivos propuesta
Modelado Predictivo De La Demanda ATS Para La Optimización Sectorial En CENAME R Basado En Datos 2024-2025.	Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025, utilizando recursos (A) disponibles con la información existente, con la finalidad de (R) disminuir la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementad	Analizar (S) los patrones de utilización de sectores mediante métricas estadísticas, (M) detallando el comportamiento de los datos del 2024 al 2025, utilizando información histórica (A) accesible mediante registros operacionales, para la (R) optimización de parámetros de sectorización previo a su implementación (T) en el cuarto trimestre del 2026.	Teoría de Demanda y Oferta, Teoría de Colas, Teoría de Optimización de Redes, Teoría de la Cuarta Revolución Industrial	Plan de Vuelo, Capacidad, Millas, Sectorización, Proyección	Se establece que la población teórica consiste en el flujo continuo de las operaciones aéreas que se registran en el aplicativo de ATFM. Para la presente investigación se ha considerado una muestra censal temporal de operaciones aéreas en CENAMER correspondientes a los años 2024 y 2025.	En concordancia a lo expuesto en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, la presente investigación no considera técnicas de muestreo debido a que se trabajara con la población. Las técnicas de muestreo no aplican para este caso debido a que podría alterar la estructura temporal de los datos y afectar los patrones en	1. El análisis de patrones utilizados para el periodo 2024-2025 permitió la identificación de considerables diferencias en el nivel de ocupación de los sectores; de igual manera se observa el crecimiento constante del rubro de regional. El resultado de este análisis evidencio que el nivel de incidencia en los sectores continentales presenta un mayor grado, mientras que los oceánicos presentan poca incidencia con valores	Plan Estratégico para la Implementación del Sistema Predictivo Basado en Algoritmo SARI MA para la Optimización de la Distribución de la Capacidad Sectorial en CENAMER.	Implementar el modelo predictivo SARIMA basado en series de tiempo para la predicción de tráfico aéreo en los sectores de control de CENAMER (S) mediante el uso de datos operacionales históricos del 2022-2025 (A) para lograr un error de predicción menor al 7% (M) para un periodo de 3 meses (T) con el fin de mejorar la planificación operativa bajo criterios de seguridad

o (T)  
mediante un  
piloto el  
cuarto  
trimestre de  
2026.

las atípicos,  
operaciones afectando de  
s de control esta manera  
de tránsito los  
aéreo, así estadísticos;  
como la esto genera  
estacionali una  
dad y distribución  
tendencias. desigual de  
En el carga y en la  
análisis de estructura de  
series de los datos  
tiempo es ocasiona  
necesario distribuciones  
mantener no  
una paramétricas.  
continuida La  
d identificación  
cronológic de patrones  
a que permitirá  
permita establecer  
respaldar parámetros  
la cuantitativos  
autenticida para realizar  
d de los ajustes  
resultados sectoriales  
y modelos según las  
predictivos necesidades  
. Por lo del personal  
tanto, el ATS,  
hecho de considerando  
no incluir una mayor  
una técnica incidencia en  
de los sectores  
muestreo continentales  
no C1 y C2.  
representa Económicame  
una nte, la  
limitante, distribución de  
sino que es sectores

aeronáutica  
(R).

una decisión argumentada para el tipo de análisis temporal y econométrico aducido por Rahim et al. (2018). permitirá la optimización del personal ATS, reduciendo la necesidad de asignar controladores aéreos a áreas de baja demanda, lo que representaría un uso ineficiente de los recursos.

Modelado Predictivo De La Demanda ATS Para La Optimización Sectorial En CENAME R Basado En Datos 2024-2025.	Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025, utilizando recursos (A) disponibles con la información existente,	Examinar (S) las proyecciones para el periodo 2026 utilizando modelos de series de tiempo (M) evaluando R-cuadrado ajustado y error del pronóstico, con bases de datos (A) aplicables con herramientas analíticas, (R) validando el modelo predictivo para la planificación	Teoría de Demanda y Oferta, Teoría de Colas, Teoría de Optimización de Redes, Teoría de la Cuarta Revolución Industrial	Plan de Vuelo, Capacidad, Millas, Sectorización, Proyección	Se establece que la población teórica consiste en el flujo continuo de las operaciones aéreas que se registran en el aplicativo de ATFM. Para la presente investigación se ha considerado una muestra censal temporal de operaciones aéreas en CENAMER	En concordancia a lo expuesto en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, la presente investigación no considera técnicas de muestreo debido a que se trabajara con la población. Las técnicas de muestreo no aplican para este	2. El modelado predictivo para el 2026 permite visualizar el comportamiento esperado del tráfico aéreo dentro del aplicativo; la comparación del MAE, R-cuadrado y AIC permiten entender de manera más concreta la precisión de los modelos, lo cual evidencia los modelos SARIMA y	Plan Estratégico para la Implementación del Sistema Predictivo Basado en Algoritmo SARI MA para la Optimización de la Capacidad Sectorial en CENAMER.	Integrar el modelo predictivo SARIMA en los procesos operativos de CENAMER (S) para la evaluación de capacidad enfocada a la reducción en al menos 10% (M) de picos de saturación sectorial a través del uso de datos históricos y resultados proyectados (A) con la
---	--	---	---	---	--	---	---	---	--

<p>con la finalidad de (R) disminuir la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementado (T) mediante un piloto el cuarto trimestre de 2026.</p>	<p>(T) previo a un piloto para el periodo 2026.</p>	<p>correspondientes a los años 2024 y 2025.</p>	<p>caso debido a que podría alterar la estructura temporal de los datos y afectar los patrones en las operaciones de control de tránsito aéreo, así como la estacionalidad y tendencias. En el análisis de series de tiempo es necesario mantener una continuidad cronológica que permita respaldar la autenticidad de los resultados y modelos predictivos. Por lo tanto, el</p>	<p>ARIMA presentan el mejor rendimiento del conjunto, lo cual se puede ligar a la necesidad de tener un claro entendimiento de los patrones y estacionalidad de las series. La superioridad de estos modelos indica que, de los datos analizados, la precisión predictiva se da a raíz de la capacidad de estos de entender estructuras complejas respecto al ciclo de los datos.</p>	<p>finalidad de optimizar los recursos en la asignación de sectores de control (R) durante una etapa de 3 meses (T) posterior a la implementación y validación del modelo.</p>
---	---	---	---	---	--

						hecho de no incluir una técnica de muestreo no representa una limitante, sino que es una decisión argumentada para el tipo de análisis temporal y econométrico aducido por Rahim et al. (2018).				
Modelado Predictivo De La Demanda ATS Para La Optimización Sectorial En CENAME R Basado En Datos 2024-2025.	Optimizar (S) la distribución de los sectores mediante una disminución del 10% de la capacidad máxima, validado (M) mediante simulaciones con datos históricos del 2024 al 2025,	Evaluar (S) el impacto del cambio en la sectorización mediante simulaciones y análisis de los KPIs, (M) comparando resultados con el modelo actual, utilizando supuestos de los registros (A) mediante el modelado de datos, para	Teoría de Demanda y Oferta, Teoría de Colas, Teoría de Optimización de Redes, Teoría de la Cuarta Revolución Industrial	Plan de Vuelo, Capacidad, Millas, Sectorización, Proyección	Se establece que la población teórica consiste en el flujo continuo de las operaciones aéreas que se registran en el aplicativo de ATFM. Para la presente investigación se ha considerado	En concordancia a lo expuesto en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, la presente investigación no considera técnicas de muestreo debido a que se trabajara con la	3. Las simulaciones integradas para analizar el impacto de los modelos al considerar la sectorización muestran una mejora significativa entre el balance existente de fatiga y eficiencia laboral; Estas mejoras tienen	Plan Estratégico para la Implementación del Sistema Predictivo Basado en Algoritmo SARI MA para la Optimización de la Distribución de la Capacidad Sectorial en CENAMER.	Capacitar al 100% del personal de la coordinación ATFM de CENAMER en la aplicación, interpretación y uso del modelo predictivo implementado (S) a través de un programa estructurado	

utilizando recursos (A) disponibles con la información existente, con la finalidad de (R) disminuir la fatiga y la subutilización del personal ATS, implementado (T) mediante un piloto el cuarto trimestre de 2026.

(R) determinar las políticas de la gestión del espacio aéreo para (T) su uso en el cuarto trimestre del 2026.

una muestra censal temporal de operaciones aéreas en CENAMER correspondientes a los años 2024 y 2025.

población. Las técnicas de muestreo no aplican para este caso debido a que podría alterar la estructura temporal de los datos y afectar los patrones en las operaciones de control de tránsito aéreo, así como la estacionalidad y tendencias. En el análisis de series de tiempo es necesario mantener una continuidad cronológica que permita respaldar la autenticidad del enfoque en la reducción de variabilidad de la carga operativa y la disminución del riesgo en las operaciones ATS, al igual que una mejora económica de las operaciones institucionales. La optimización de los sectores impacta significativamente el uso de personal disponible, donde la reducción de la necesidad en los turnos o sectores de baja demanda se traduce directamente a una reducción de costos.

de 20 horas formativas en teoría y evaluación práctica con requisito de calificación mínima de aprobación de 85% (M) a través de planificación horaria destinada a la capacitación, integrando casos de estudio y ejercicios con datos operativos (A) con la finalidad de garantizar la correcta ejecución del modelo para la gestión del tráfico aéreo (R) en un periodo de 1 mes (T).

d de los resultados y modelos predictivos . Por lo tanto, el hecho de no incluir una técnica de muestreo no representa una limitante, sino que es una decisión argumentada para el tipo de análisis temporal y econométrico aducido por Rahim et al. (2018).

Fuente: Elaboración propia

## REFERENCIAS

- Aguilar Valarezo, L. (2024). *Desarrollo de modelos de Machine Learning para la predicción de vuelos en el espacio aéreo español* [Masters, E.T.S. de Ingenieros Informáticos (UPM)]. <https://oa.upm.es/83446/>
- AHAC. (2024). *Política Estatal de Seguridad Operacional* [Regulación de Aviación]. <https://ahac.gob.hn/Documentos/SSP/SMS/POLITICAS/POLITICA%20ESTATAL%20DE%20SEGURIDAD%20OPERACIONAL.pdf>
- AHAC. (2026). *Regulación de Aeronáutica Civil—RAC ATS* [Reglamento de Aviación]. [https://ahac.gob.hn/Proyecto\\_Regulaciones](https://ahac.gob.hn/Proyecto_Regulaciones)
- Alas, E. (2025, September 12). *El Salvador se posiciona como centro global de transporte aéreo* [Portal de Noticias Nacionales e Internacionales]. El Salvador. El Salvador. <https://www.elsalvador.com/dinero-y-negocios/vision-empresarial/el-salvador-se-posiciona-como-centro-global-del-transporte-aereo-/1242173/2025/>
- Aliche, O. B., Oghenekaro, A. P., Egbono, F., Pwajok, M. L., Bassi, H. H., & Betrand, C. U. (2025). Improved System-Wide Information Management for Aeronautical Data Chain Using Air Traffic Control Infrastructure: A Nigerian Perspective. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 11(4), 115–127. <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20251104.11>
- Alonso, J. L., & Martin, J. A. (2024). *Fatiga y Estrés en el Trabajo Marítimo* [Tesis de Maestría]. Universidad de La Laguna. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/36872>
- ALTA. (2026, January 16). *Tráfico aéreo en América Latina y el Caribe (LAC) creció 2,3% interanual en noviembre*. <https://alta.aero/news/trafico-aereo-en-america-latina-y-el-caribe-lac-crecio-23-interanual-en-noviembre&lang=es>
- Arteta Heins, A., & Montes Rodríguez, K. (2024). *Pronóstico de la demanda de pasajeros de transporte aéreo: Un estudio de caso de Colombia* [Trabajo de grado, Universidad de la Costa]. <http://hdl.handle.net/10882/13243>
- Asamblea Legislativa. (2023, April 17). *Buscan modernizar servicios de transporte aéreo con reformas a la ley de aviación civil | Asamblea Legislativa de El Salvador*.

<https://www.asamblea.gob.sv/node/12752>

Asán Caballero, L., Rojas Delgado, J., Jiménez Moya, G. E., Asán Caballero, L., Rojas Delgado, J., & Jiménez Moya, G. E. (2022). Algoritmo de predicción de series de tiempo para el pronóstico del Tráfico Aéreo basado en redes neuronales artificiales. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 16(4), 84–100.

Bernal Torres, C. A. (2010). *Metodología de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (O. Fernández Palma, Ed.; Tercera edición). Pearson Educación Pearson/Prentice Hall.

Bernal Torres, C. A. (2022). *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Pearson Education.

Bryman, A. (2016a). *Social Research Methods*. Oxford University Press.

Bryman, A. (2016b). *Social research methods* (Fifth edition). Oxford University Press.

Bustos Moreno, C. A., Zuluaga Grisales, H. F., & Martín Fúquene, S. L. (2022). *Prototipo para predecir operaciones aéreas con el fin de optimizar turnos laborales para los controladores en el Aeropuerto Camilo Daza*. <http://hdl.handle.net/10882/11870>

CENAMER. (2026). *OPERACIONES ATFM* [Cuadro Excel de registros; Excel].

COCESNA. (2025). *PLAN ESTRATÉGICO COCESNA* [Portal Institucional]. COCESNA | Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea. <https://cocesna.org/plan-estrategico/>

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3. ed., [Nachdr.]). SAGE Publ.

D'Agostino, S., & Piarrou, M. E. (2011). *Plan de Vuelo Electrónico para la Aviación Civil Argentina*. V Simposio de Informática en el Estado (SIE 2011) (XL JAIIO, Córdoba, del 29 de agosto al 2 de septiembre de 2011). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/138880>

DGAC. (2025, June). *Programa de Recuperación de la Aviación Civil de Guatemala* [Plan de implementación]. <https://www.dgac.gob.gt/wp-content/uploads/2025/06/PPPI-RECUP-AVIACION-CIVIL-Final-23-junio-2025.pdf>

Escobar, J., Bravo, J. J., & Vidal, J. C. (2013). *Optimización de una red de distribución con*

*parámetros estocásticos usando la metodología de aproximación por promedios muestrales*. 31(01), 135–160.

- European Union. (2016). *Regulation 2016 | 679 of the European Parliament* [Portal de Legislaciones Europeas]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>
- Flordeliza, G. Z. A., Acosta, M. F., Alviar, H. R. C., Del Rosario, E. C., Esluzar, J. R. J., Manimbo, S. M., & Ortega, J. L. (2024). Human-Centered Approach of Philippine Air Traffic Control Operators (ATCOS): A Comprehensive Cognitive Evaluation Towards Decision Making and Resiliency. *International Journal of Progressive Research in Science and Engineering*, 5(07), 1–29.
- Francisco, K. A., & Lim, V. L. (2022). *Philippine Air Transport Infrastructure: State, Issues, Government Strategies* (Working Paper Nos. 2022–62). PIDS Discussion Paper Series. <https://www.econstor.eu/handle/10419/284599>
- García Sabater, J. P. (2016). *Aplicando Teoría de Colas en Dirección de Operaciones* [Propuesta de Implementación]. <https://personales.upv.es/jpgarcia/linkedddocuments/teoriadecolasdoc.pdf>
- Girón Girón, L. A. (2023). *Estimación de demanda de transporte aéreo de pasajeros desde un enfoque de redes para aeropuertos tipo hub: Caso Aeropuerto El Dorado, Bogotá, Colombia* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/items/90bb719c-6b02-4d4f-866a-d3133b771a19>
- Hernández Sampieri, R., & Fernández-Collado, C. F. (2014). *Metodología de la investigación* (P. Baptista Lucio, Ed.; sexta edición). McGraw-Hill Education.
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativas, cualitativas y mixtas* (First edition). McGraw-Hill Education.
- IATA. (2023a). *EL VALOR DEL TRANSPORTE AÉREO PARA GUATEMALA* [Documento informativo]. <https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/voa-translations/el-valor-del-transporte-aereo-para-guatemala--sp.pdf>
- IATA. (2023b). *El Valor del Transporte Aéreo para Honduras* [Documento informativo]. [115](https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/voa-</a></p></div><div data-bbox=)

translations/el-valor-del-transporte-aereo-para-honduras--sp.pdf

IATA. (2024, December 10). *Fuertes beneficios para las aerolíneas en 2025 pese a la persistente crisis en las cadenas de suministro*. [Documento]. IATA.

<https://www.iata.org/contentassets/f32de4cd05e2498a824e67fadd658cb7/2024-12-10-01-sp.pdf>

IATA. (2026). *IATA: Delays Caused by European ANSPs Cost EUR 16.1 billion* [Portal Institucional]. IATA. <https://www.iata.org/en/publications/economics/chart-week/chart-of-the-week-23-january-2026/>

Indra. (2018, March 6). *Indra moderniza los sistemas de gestión de tráfico aéreo de Costa Rica y refuerza la seguridad y eficiencia de los vuelos en todo el país | Actualidad*. Indra Group. <https://www.indragroup.com/es/noticias/indra-moderniza-sistemas-gestion-traffic-aereo-costa-rica-refuerza-seguridad-eficiencia>

INDRA. (2023, May 10). *Indra set to standardize Air Traffic Management systems and reinforce the single sky in Central America | Actualidad*. Indra Group.

<https://www.indragroup.com/en/news/indra-set-standardize-air-traffic-management-systems-reinforce-single-sky-central-america>

Inglada Pérez, L., Coto Millán, P., Inglada López de Sabando, V., & Casares Hontañón, P. (2020). Impacto de los shocks externos en el transporte aéreo. Aplicación al caso español de modelos SARIMA con análisis de intervención. *Anales de ASEPUMA* (28), 6.

Iza Quishpe, A. P. (2021). *ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE LA DEMANDA A CORTO PLAZO EN FUNCIÓN DE UNA ONDA MADRE* [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19747>

Jaimes Zamora, A. (2017). *FACTORES PROMOTORES DE ESTRÉS LABORAL EN CONTROLADORES DE TRÁFICO AÉREO EN MÉXICO* [Tesis de grado, Universidad Autónoma de México].

[https://www.researchgate.net/publication/332304625\\_FACTORES\\_PROMOTORES\\_DE\\_ESTRES\\_LABORAL\\_EN\\_CONTROLADORES\\_DE\\_TRAFICO\\_AEREO\\_EN\\_MEXICO](https://www.researchgate.net/publication/332304625_FACTORES_PROMOTORES_DE_ESTRES_LABORAL_EN_CONTROLADORES_DE_TRAFICO_AEREO_EN_MEXICO)

Karch, J. D. (2023). Outliers may not be automatically removed. *Journal of Experimental*

- Psychology: General*, 152(6), 1735–1753. <https://doi.org/10.1037/xge0001357>
- La Gaceta. (2017, March 15). *DECRETO No. 178-2016*. La Gaceta.  
[https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/Ley\\_inspeccion\\_del\\_trabajo.pdf](https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/Ley_inspeccion_del_trabajo.pdf)
- Llanes-Font, M., & Lorenzo-Llanes, E. (2021). *La cuarta revolución industrial y una nueva aliada: Calidad 4.0*. 27.  
<https://www.redalyc.org/journal/1815/181566671006/181566671006.pdf>
- López, A. M., Flores, M. A., & Sánchez, J. I. (2017). Modelos de series temporales aplicados a la predicción del tráfico aeroportuario español de pasajeros: un enfoque agregado y desagregado. *Studies of Applied Economics*, 35(2), 395–418.  
<https://doi.org/10.25115/eea.v35i2.2478>
- López Aragón, D. N. (2023, November). *Propuesta metodológica para la gestión de tránsito aéreo a baja altura de drones para la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil)* [Propuesta metodológica]. Universidad ean.  
<http://hdl.handle.net/10882/13243>
- López, J. (2018). *Análisis de series de tiempo: Pronóstico de demanda de uso de aeropuertos en Argentina al 2022*. <https://ri.itba.edu.ar/entities/publication/eabae3b5-1b6f-4154-82a1-ff1e1aceab24>
- Lozano Armótegu, V. A. (2024). *Determinantes del crecimiento del transporte aéreo de pasajeros en Colombia 2005—2022* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/items/cc783789-ee51-4ba7-b47e-1401ff2f461b>
- Mogotocoro, J. (2024). *Tres técnicas de regresión con aprendizaje de máquina: Regresiones Lineales, Ridge y Lasso* [Tesis para título de Matemático, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/b992f2f7-0561-4820-89ca-d33e68fc4f94/download>
- Morata Pérez, A. (2023). *Viabilidad e implementación de la tecnología ADS-B en el espacio aéreo de Filipinas* [Tesis de Maestría, Universidad Europea de Madrid].  
<https://titula.universidadeuropea.com/handle/20.500.12880/6760>
- OACI. (2006). *Convenio sobre Aviación Civil Internacional* [Convenio Internacional]. OACI.  
[https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/pdf/chicago\\_conv.pdf](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/chicago_conv.pdf)

- OACI. (2016). *Gestión de la Seguridad: Anexo 19* [Reglamento de Aviación]. OACI.  
[https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/010\\_anexo\\_19\\_vigente\\_nov16\\_1.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/010_anexo_19_vigente_nov16_1.pdf)
- OACI. (2020). *Manual para la supervisión de los enfoques de gestión de la fatiga* [Regulación de Aviación]. OACI. <https://elibrary.icao.int/product/234627>
- Obioma, N. (2013). An Analysis of the Impact of Air Transport Sector to Economic Development in Nigeria. *IOSR Journal of Business and Management*, 14(5), 41–48.  
<https://doi.org/10.9790/487X-1454148>
- Phyoe, S. M., Guo, R., & Zhong, Z. W. (2016). AN AIR TRAFFIC FORECASTING STUDY AND SIMULATION. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 2(3), 55–69. <https://doi.org/10.20319/Mijst.2016.23.5569>
- Plan Colombiano de Seguridad Operacional*. (2022, December 8). Aeronáutica Civil.  
<https://www.icao.int/sites/default/files/safety/GASP/GASP%20Library/National%20aviation%20safety%20plans/Colombia-NASP-PCSO-V2.pdf?>
- Rahim, Hastuti, Pradipta, Bustanul, & Azizah. (2018). *The Influence of Respondent Characteristics and Different Areas on Small-Scale Fisherman Household Income of Urban Coastal Areas in Pare-Pare City, South Sulawesi—Test Repository*.  
<https://eprints.unm.ac.id/18250/>
- ReporterLinker. (2024). *Costa Rica Civil Aviation Industry Outlook 2024—2028*.  
<https://www.reportlinker.com/clp/country/665603/726311?>
- República de Honduras. (1982). *Constitución de la República de Honduras*.
- Revila Novella, P. (2013). *Métodos estadísticos de depuración e imputación de datos* [Tesis doctoral, Universidad de Alcalá].  
<https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/10017/20211/3/Tesis%20Pedro%20Revilla.pdf>
- Reyes González, A., & González Veloza, J. J. F. (2022). *Predicción de la velocidad del viento mediante un modelo Gradient Boosting Tree de machine learning aplicable en la gestión del tránsito aéreo* [Fundación Universitaria Los Libertadores. Sede Bogotá.].  
<http://hdl.handle.net/11371/5352>
- Ricardo, D., Sraffa, P., & Dobb, M. (2004). *The works and correspondence of David Ricardo: On*

*the principles of political economy and taxation* (Vol. 1). Liberty Fund.

Rodríguez, E. (2010). *ESTADÍSTICA Y PSICOLOGÍA: ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA INFERENCIA ESTADÍSTICA*. 6–7, 165–171.

Rodríguez García, V. M. (2021). *Ús d'aeronaus de fuselatge estret en operacions de llarg recorregut* [Tesis de postgrado, Universitat Autònoma de Barcelona].  
<https://ddd.uab.cat/record/248444>

Sanaei, R., Pinto, B. A., & Gollnick, V. (2021). Toward ATM Resiliency: A Deep CNN to Predict Number of Delayed Flights and ATFM Delay. *Aerospace*, 8(2), 28.  
<https://doi.org/10.3390/aerospace8020028>

Secretaría de Trabajo y Seguridad Social. (2024). *Código del trabajo* [Ley].  
[https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/codigo\\_de\\_trabajo.pdf](https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/codigo_de_trabajo.pdf)

Valientes Palacios, J. L. (2007). *Realización de prácticas para la asignatura de Gestión del Espacio Aéreo* [Trabajo de grado, Universitat Politècnica de Catalunya].  
<https://hdl.handle.net/2099.1/4051>

Viegras, J. C., Rial, L. N., & Gajst, I. F. (2000). Contabilidad y Auditoría: La información prospectiva: Proyecciones o Pronósticos. *10/2000*, 6(12).  
<https://ojs.economicas.uba.ar/Contyaudit/issue/view/32>

Vos, R. W., Sun, J., & Hoekstra, J. M. (2024). *A Transformer-based Trajectory Prediction Model to Support Air Traffic Demand Forecasting* [Investigación de Conferencia]. Delt University of Technology. [https://repository.tudelft.nl/file/File\\_a9b027a4-8d81-4fb6-84d4-3d72e3e11c42?preview=1](https://repository.tudelft.nl/file/File_a9b027a4-8d81-4fb6-84d4-3d72e3e11c42?preview=1)

# ANEXOS

## ANEXO 1: CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE DATOS



### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA O INSTITUCIÓN

Nombre y apellido del Director o Gerente: **Roger Pérez**  
Puesto Laboral: **Gerente Senior de Navegación Aérea**  
Empresa o Institución: **COCESNA**  
Dirección principal de la Empresa o Institución: **150 metros sur del Aeropuerto Internacional Toncontín**  
Ciudad: **Tegucigalpa** Departamento: **Francisco Morazán** Día: **18** Mes: **marzo** Año: **2026**

Estimado Señor(a): Ing. Roger Pérez

Reciba un cordial y atento saludo. Por medio de la presente deseamos solicitar su apoyo, dado que somos alumnos de UNITEC y nos encontramos desarrollando el Trabajo de Tesis previo a obtener nuestro título de maestría en Analítica de Negocios.

Hemos seleccionado como tema **PROYECCIÓN ECONOMETRICA DE DEMANDA AERONÁUTICA: ESTRATEGIAS DE BALANCEO DE CARGA PARA CONTROLADORES DE TRÁNSITO AÉREO (2024-2025)**, por lo que estaríamos muy agradecidos de contar con el apoyo de la empresa que usted representa para poder desarrollar nuestra investigación. En particular, dicha solicitud se circunscribe a peticionar que se nos autorice a realizar: **Uso de datos institucionales para el desarrollo de investigación y autorización para realizar pruebas complementarias en caso de requerirlo.**

A la espera de su aprobación, me suscribo de Usted.

Atentamente,

Misael Alvarez

No. de cuenta: 12423246

Juan Bados

No. de cuenta: 12423255

Por este medio, COCESNA Autoriza la realización dentro de sus instalaciones o del uso de información de la empresa en el proyecto de investigación de Tesis de Postgrado antes mencionado.

Ing. Roger Alberto Pérez

(Nombre y sello del Director / Gerente )



Vo.Bo.

[acna@cocesna.org](mailto:acna@cocesna.org)

Correo electrónico de Director/Gerente