



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Modelo de teoría de colas para optimizar el número de puertas de ingreso de vehículos
de carga en el puerto de Guayaquil

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

Matemático

Presentado por:

Christian Daniel Rivera Vanegas

Julio Jose Ulloa Verdezoto

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

A quienes fueron, son y serán parte de mi vida.

Christian Rivera V.

DEDICATORIA

A mi familia y a mis profesores, por su apoyo incondicional y paciencia durante este tramo.

Julio Ulloa V.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional en este camino. A mi tutor por su orientación, apoyo y recomendaciones durante el desarrollo de este proyecto.

Christian Rivera V.

AGRADECIMIENTOS

Mi más grato agradecimiento a mi hermano mayor, Jorge Antonio Ulloa Verdezoto, quien me apoyo hasta el final durante este camino. A mi madre, por su inquebrantable paciencia. Y a mis profesores de carrera, por su valiosa guía académica.

Julio Ulloa V.

Declaración Expresa

Nosotros Christian Daniel Rivera Vanegas y Julio José Ulloa Verdezoto acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 27 de mayo del 2025.



Christian Daniel Rivera
Vanegas



Julio José Ulloa
Verdezoto

EVALUADORES

Luz Marchan Mendoza, Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA

Fernando Sandoya Sánchez, Ph.D.

TUTOR

RESUMEN

En este proyecto se analiza el sistema de ingreso vehicular en una de las entradas de un puerto, con el objetivo de evaluar su desempeño y proponer mejoras que optimicen el flujo de vehículos. Se plantea la hipótesis de que ampliar la capacidad de cola y aumentar el número de servidores reducirá significativamente los tiempos de espera y evitará la ocupación indebida de una avenida no diseñada para el estacionamiento de camiones. La justificación se sustenta en la necesidad de mejorar la eficiencia operativa y disminuir la congestión, lo que impacta positivamente en la productividad y en el entorno urbano. Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron datos administrativos del puerto correspondientes al periodo de enero de 2024 a junio de 2025. Los registros fueron depurados para eliminar datos incompletos o atípicos, y el sistema se modeló mediante teoría de colas, aplicando simulaciones y pruebas de ajuste para validar los parámetros. Los resultados evidenciaron que el sistema actual, representado como una red de colas en tándem conformada por dos etapas —la primera de tipo G/G/3 y la segunda de tipo G/G/2—, presenta altos niveles de ocupación y tiempos de espera prolongados en horas pico. Las simulaciones mostraron que incrementar la capacidad de servicio, especialmente en la primera etapa, reduce de forma significativa los tiempos de espera totales y el tamaño acumulado de la cola. Se concluye que un rediseño basado en las alternativas simuladas mejora la eficiencia del sistema y contribuye a la descongestión del área portuaria.

Palabras Clave: Teoría de colas, Simulación, Puertos, Optimización.

ABSTRACT

In this study, the vehicle entry system at one of the port's access points is analyzed with the aim of evaluating its performance and proposing improvements to optimize traffic flow. The working hypothesis suggests that expanding queue capacity and increasing the number of servers would significantly reduce waiting times and prevent the unauthorized use of an avenue not intended for truck parking. The justification lies in the need to improve operational efficiency and reduce congestion, thus positively impacting productivity and the surrounding urban environment. Administrative data from the port, covering the period from January 2024 to June 2025, were used. The dataset was cleaned to remove incomplete or atypical records, and the system was modeled using queuing theory. Simulations and goodness-of-fit tests were applied to validate the parameters and assess different operational scenarios. The results showed that the current system, modeled as a tandem queue network with two stages —the first of type G/G/3 and the second of type G/G/2— experiences high utilization rates and prolonged waiting times during peak hours. Simulation outcomes indicated that increasing service capacity, especially in the first stage, leads to significant reductions in both total waiting time and accumulated queue length. It is concluded that a redesign based on the simulated alternatives can substantially improve system efficiency, reduce congestion, and enhance the operational performance of the port's access infrastructure.

Keywords: *Queuing theory, Simulation, Ports, Optimization.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Marco teórico	6
1.4.1 Fundamentación teórica	6
1.4.2 Estado del arte	8
1.4.3 Elementos de teoría de colas aplicados al sistema portuario	10
CAPÍTULO 2	12
2. METODOLOGÍA	12
2.1 Enfoque Metodológico General	12
2.2 Formulación de Alternativas de Solución	12

2.3	Descripción y Selección de la Mejor Alternativa	13
2.4	Diseño Conceptual del Sistema Propuesto	14
2.5	Diseño Detallado y Metodología Aplicada	15
2.6	Consideraciones Éticas y Legales	16
2.7	Estrategia de Identificación y Análisis Causal	17
2.8	Descripción de Variables	17
CAPÍTULO 3		19
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	19
3.1	Análisis Exploratorio de los Datos	19
3.2	Evaluación de Ajuste de Distribuciones	23
3.2.1	Tiempos de Inter-llegadas	23
3.2.2	Tiempos de servicio en Pre-Gate	25
3.2.3	Tiempos de servicio en Gate	27
3.3	Modelación y Simulación	29
3.4	Resultados Objetivo 1	33
3.5	Resultados Objetivo 2	33
3.6	Resultados Objetivo 3	34
3.6.1	Tamaño de la cola del sistema	35
3.6.2	Tiempos de espera en el sistema	35
3.6.3	Utilización del sistema	36
3.7	Resultados Objetivo 4	36
3.7.1	Utilización del sistema	37

3.7.2	Tamaño de la cola del sistema	38
3.7.3	Tiempos de espera en el sistema	39
3.7.4	Estabilidad de los promedios y máximos en la simulación	39
3.8	Limitaciones y Observaciones	41
CAPÍTULO 4		43
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		43
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Imagen satelital de la zona residencial afectada por el tránsito vehicular	2
Figura 1.2	Configuración actual para el proceso de entrada a la terminal portuaria	3
Figura 1.3	Modelo G/G/c: una cola de clientes es atendida por c servidores en paralelo, cuyas salidas se unifican.	7
Figura 3.1	Frecuencia mensual del ingreso de camiones al puerto	22
Figura 3.2	Distribución promedio de vehículos ingresados por hora del día y por mes	22
Figura 3.3	Análisis de ajuste de los tiempos de inter-llegada: comparación entre distribución empírica y modelos paramétricos (Exponencial, Gamma, Lognormal y Weibull).	23
Figura 3.4	Ajuste de los tiempos de servicio en Pre-Gate: comparación entre distribución empírica y modelos paramétricos (Exponencial, Gamma, Lognormal y Weibull).	26
Figura 3.5	Ajuste de los tiempos de servicio en Gate: comparación entre distribución empírica y modelos paramétricos (Exponencial, Gamma, Lognormal y Weibull).	28
Figura 3.6	Comportamiento del tamaño de cola del sistema al aumentar las simulaciones	35
Figura 3.7	Comportamiento de la media de los tiempos de espera del sistema al aumentar las simulaciones	36
Figura 3.8	Comparación de las longitudes máximas de cola entre configuraciones	40
Figura 3.9	Comparación de las longitudes medias de cola entre configuraciones	40

Figura 3.10 Comparación de los tiempos de espera maximos en el sistema entre configuraciones 41

Figura 3.11 Comparación de los tiempos de espera medios en el sistema entre configuraciones 41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Estadísticas descriptivas de las variables principales	21
Tabla 3.2	Resultados de bondad de ajuste (AIC) para los modelos de tiempos de inter-llegada.	24
Tabla 3.3	Resultados de bondad de ajuste (AIC) para los modelos de tiempos de servicio en Pre-Gate.	26
Tabla 3.4	Resultados de bondad de ajuste (AIC) para los modelos de tiempos de servicio en Gate.	28
Tabla 3.5	Parámetros del sistema actual por servicio	34
Tabla 3.6	Utilización de los servidores en la configuración actual	36
Tabla 3.7	Utilización de los servidores comparando las diferentes configuraciones	37
Tabla 3.8	Promedios y Máximos de la cola por cada configuración del sistema	38
Tabla 3.9	Promedios y Máximos de los tiempos de espera por cada configuración del sistema	39

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

"El sector marítimo-portuario constituye uno de los pilares fundamentales del comercio internacional" (Arévalo, 2017).

Esta afirmación refleja la importancia que tiene dicho sector en el desarrollo económico del país. No obstante, en la actualidad, el Puerto de Guayaquil enfrenta una serie de deficiencias operativas, particularmente en la gestión del ingreso de vehículos de carga a sus instalaciones. Esta situación genera cuellos de botella que, como consecuencia, provocan retrasos en la ubicación de contenedores, en la operación de grúas, en la salida de embarcaciones, así como largas filas de camiones que ocupan espacio en las vías urbanas, afectando el tránsito de vehículos, la calidad de vida de los habitantes del sector y la eficiencia logística del entorno portuario.

1.1 Descripción del problema

La situación actual en una de las entradas de una terminal portuaria ubicada en Ecuador, evidencia una saturación recurrente en la atención a los numerosos vehículos que acuden diariamente para la entrega de contenedores. Esta condición genera tiempos de espera prolongados que afectan significativamente la eficiencia operativa del sistema, así como otros aspectos relacionados con la logística y el entorno urbano.

Parte del proceso de ingreso vehicular se desarrolla, tal como se ilustra en la Figura 1.1, en una zona urbana de uso residencial, lo que provoca afectaciones directas a la calidad de vida de los habitantes del sector debido a la acumulación constante de camiones de carga contenerizada. Adicionalmente, la vía de acceso no cuenta con una infraestructura adecuada para atender la actual demanda operativa. Ante esta limitación, se ha extendido el uso de dicha vía hacia su conexión con una avenida principal, lo que ha resultado en la ocupación de tramos importantes de calles compartidas con el tránsito ciudadano, ampliando así el área de impacto del problema.

Figura 1.1.

Imagen satelital de la zona residencial afectada por el tránsito vehicular



Fuente: Elaboración propia

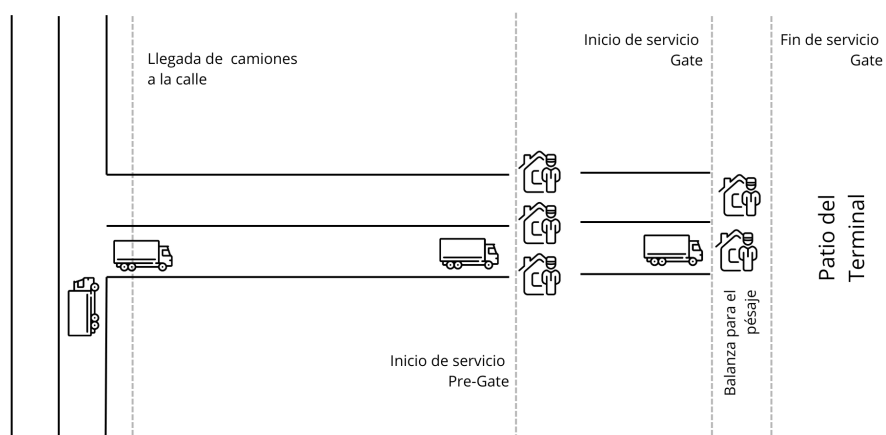
La terminal portuaria objeto de estudio tiene actualmente implementado un sistema de ingreso vehicular compuesto por dos etapas. En la primera, denominada Pre-Gate, un guardia de seguridad realiza una inspección inicial a la cabina del conductor. Una vez autorizado el ingreso, el vehículo se dirige hacia la segunda etapa, denominada Gate, donde se verifican el tipo de contenedor, el contenido declarado, su ubicación y peso.

Bajo condiciones normales, el acceso al Pre-Gate dispone de dos carriles habilitados para camiones. Sin embargo, en horarios de alta demanda se activa de forma provisional un tercer carril. Esta medida ha generado molestias entre los residentes de las zonas aledañas, debido al incremento del tránsito pesado y la ocupación del espacio público en áreas residenciales.

Con el objetivo de identificar las causas de esta problemática, se propone el análisis de indicadores que permitan evaluar el comportamiento actual del sistema de ingreso vehicular. A partir de esta evaluación, se busca determinar las características que debe tener el servicio: número y capacidad de los servidores (Pre-Gate) para lograr un punto de equilibrio que asegure una capacidad de atención adecuada bajo condiciones normales, pero que también sea capaz de adaptarse a escenarios de alta demanda.

El esquema presentado en la Figura 1.2 muestra cómo se realiza el proceso de ingreso de los vehículos de carga a través de las Pre-Gates y las Gates.

Figura 1.2.
Configuración actual para el proceso de entrada a la terminal portuaria



Fuente: Elaboración propia

El problema de cuellos de botella en las puertas de entrada de los puertos se sigue investigando de forma consistente y los resultados de estos estudios, desde un modelo cuantitativo, han brindado a empresas portuarias configuraciones eficientes para el ingreso de vehículos con carga.

Investigaciones como la realizada por (Ortiz Chang, 2024) utilizan el análisis basado en teoría de colas para identificar la saturación presente en el sistema del servicio portuario, proponiendo como alternativa una configuración más eficiente y adecuada para dicho entorno.

1.2 Justificación del problema

El presente trabajo se justifica por la urgencia de optimizar la capacidad de atención que actualmente ofrece la terminal portuaria a sus clientes, ya que esta limita el desempeño logístico de la empresa e incide directamente en aspectos económicos, en la planificación operativa de los patios de almacenamiento, en la percepción de la marca y en su potencial de crecimiento.

Adicionalmente, el problema genera impactos relevantes en el entorno urbano: desde el punto de vista ambiental, al prolongar los tiempos de espera de camiones encendidos sin moverse; en lo visual, por la acumulación excesiva de vehículos en un solo punto; y en la movilidad, al generar congestión en las vías que conectan con el acceso principal del proceso.

La investigación propone un análisis sustentado en modelos matemáticos y estadísticos, orientado a brindar una solución técnica que permita optimizar el funcionamiento del sistema actual de ingreso vehicular a la terminal.

Desde una perspectiva académica, este estudio representa un aporte al campo de la logística portuaria mediante la aplicación de herramientas como la teoría de colas, una metodología útil para dar soluciones a este tipo de problemas de negocio. La investigación se

apoya en información operativa histórica de carácter agregado, lo cual permite realizar un análisis robusto y contextualizado.

Por tanto, esta investigación constituye una contribución significativa tanto para la mejora de la eficiencia operativa portuaria como para el desarrollo de soluciones aplicadas basadas en modelos matemáticos en escenarios reales de alta complejidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Aplicar un modelo de teoría de colas para descongestionar las entradas de camiones con carga contenerizada en una empresa portuaria de Guayaquil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el sistema actual de ingreso vehicular de camiones con carga contenerizada, identificando tiempos de llegada, tiempos de atención, número de puertas y niveles de congestión.
- Determinar los parámetros del sistema de colas, tasa de llegada, tasa de servicio y distribución de los tiempos, a partir de datos históricos o recolección de datos en campo.
- Formular y calibrar un modelo de teoría de colas que represente el comportamiento del ingreso de camiones en la empresa portuaria
- Evaluar escenarios alternativos con distintas configuraciones de puertas y recursos, con el fin de proponer una solución óptima o eficiente que reduzca los tiempos de espera y la congestión vehicular.

1.4 Marco teórico

1.4.1 *Fundamentación teórica*

La teoría de colas es el estudio matemático que modela las filas de espera, abstrayendo el concepto de una fila de espera a lo más básico para poder armar modelos estocásticos capaces de predecir los tiempos de espera de la cola y el tamaño de esta.

Los modelos de colas apoyan la toma de decisiones del centro de llamados al identificar y relacionar los indicadores de desempeño de interés del administrador (por ejemplo, la capacidad instalada) y los de interés de sus clientes (por ejemplo, el tiempo de espera). Los modelos también ayudan a mejorar la calidad del servicio, estimando e informando al cliente cuánto tiempo debe esperar hasta ser atendido ((Singer et al., 2008)).

En el año 1909, el Ingeniero de origen danés Agner Krarup Erlang, quien trabajaba en la central telefónica de Copenhague, presentó el primer análisis matemático de lo que hoy se conoce como teoría de colas. Erlang modeló cada llegada de las llamadas telefónicas mediante un proceso de Poisson, y avanzó hasta resolver el modelo M/D/1 en 1917 y el M/D/k en 1920; en la notación usada (llamada notación de Kendall), “M” indica un proceso de arribo ‘markoviano’ (sin memoria), “D” se refiere a un tiempo de servicio fijo (determinista) y “k” representa el número de servidores atendiendo en paralelo.

El modelo de teoría de colas más común se representa con M/M/c, es un modelo el cual está determinado por tener dos o más servidores que realizan la misma función y tienen cada uno el mismo nivel de eficacia (Abril Lopera and Franco Mendoza, 2022).

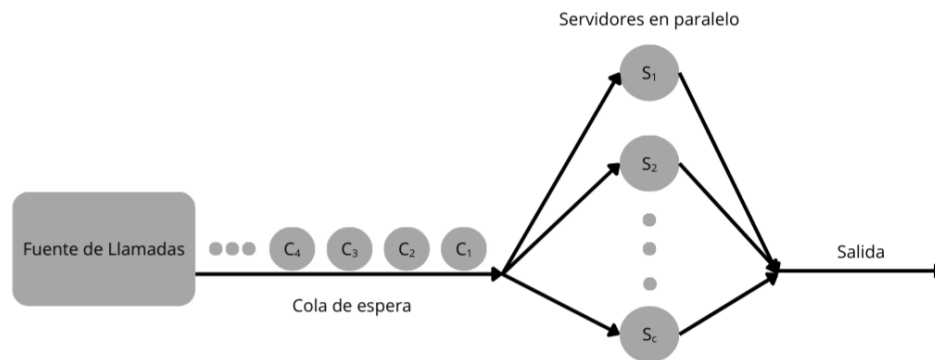
En este proyecto se utiliza un modelo más general para modelizar el proceso de arribo y atención de los camiones porta-contenedores, más específicamente, se utiliza el modelo G/G/c,

donde el símbolo G significa una distribución más general que las de la familia de los procesos markovianos.

La Figura 1.3 ilustra el modelo M/M/c, en el cual existe una única fila de clientes $C_1, C_2, \dots$, que son atendidos en paralelo por $S_1, \dots, S_c$ servidores (en este caso, $c = 4$), todos con la misma eficiencia. Una vez atendidos por alguno de los servidores S_i , los clientes concluyen su proceso en un punto común.

Figura 1.3.

Modelo G/G/c: una cola de clientes es atendida por c servidores en paralelo, cuyas salidas se unifican.



Fuente: Elaboración propia

En el contexto específico del presente estudio, el sistema analizado corresponde a la gestión de arribo y atención de camiones con contenedores destinados a la exportación a través de las Pre-Gates de un puerto de la ciudad de Guayaquil. El objetivo fundamental consiste en modelar el proceso de atención como un sistema de colas multi-canal (G/G/c), donde cada servidor representa una Pre-Gate operativa. Mediante la aplicación de modelos matemáticos de teoría de colas, se busca determinar el número óptimo de servidores (c), entendido como el número de Pre-Gates que permite ofrecer un nivel de servicio determinado, garantizando al mismo tiempo un uso eficiente de los recursos disponibles y evitando una sobreasignación que

implique costos operativos innecesarios.

1.4.2 Estado del arte

El estado de arte de la presente investigación está centrado en analizar las aplicaciones más importantes de la teoría de colas, en el ámbito de la optimización en terminales portuarias. Esta revisión es fundamental para observar el uso de modelos estocásticos en la gestión eficiente de lógicas portuarias, especialmente en los casos donde la variabilidad de la demanda y la asignación óptima de recursos son factores críticos.

(Grzelakowski and Karaś, 2022) analizaron el terminal de carga a granel HES Gdynia, en Polonia, tomando en cuenta el sistema portuario como un proceso de servicio masivo sujeto a demanda aleatoria, y además, variable. A partir de la aplicación de modelos de colas se determinaron indicadores como la tasa de ocupación de muelles, tiempos promedio de servicio y probabilidad de espera. Un resultado del estudio mostró que el terminal opera con una gran eficiencia logística y financiera, con una utilización promedio del 55% de su capacidad y el mismo porcentaje en los tiempos mínimos de espera para las embarcaciones. Y aún más, el análisis demostró la existencia de una correlación inversa entre la ocupación de los muelles y los costos unitarios de operación, sugiriendo que el uso óptimo de la infraestructura permite reducir los costos fijos y mejorar la rentabilidad del terminal.

(Boixadé, 2018), realizó un trabajo de investigación aplicado a la terminal de cemento Portcemen del puerto de Barcelona, utilizó la teoría de colas para analizar y medir recursos portuarios bajo los distintos escenarios posibles donde la demanda varía. Boixadé empleó tanto datos reales como simulaciones, con esto calculó indicadores como la probabilidad de sistema vacío, el valor óptimo de servidores y los tiempos promedio de espera. Sus investigaciones lo

llevaron a validar la utilidad del modelo M/M/c para predecir el comportamiento del sistema y, de esta forma, proponer mejoras en la asignación de los recursos, identificando también algunos límites del modelo cuando existen condiciones de sobredimensionamiento o infrautilización en la terminal.

(Budiono, 2016) presentó un estudio en el puerto de Tanjung Perak, Indonesia; en dicho estudio se desarrollaron y se aplicaron varios modelos de teoría de colas multi-servidor para la optimización de instalaciones portuarias. El trabajo se realiza a partir del modelo clásico M/M/c con llegadas Poisson y tiempos de servicio exponenciales, pero lo extiende utilizando la distribución de Erlang y lógica difusa para abordar la complejidad y la presencia de prioridades en el servicio de buques. A partir de simulaciones y comparaciones entre los enfoques matemáticos tradicionales y las técnicas de inteligencia artificial, Budiono muestra que la combinación de modelos de colas y lógica difusa no solo disminuye los tiempos de espera de los barcos, sino que permite una determinación eficiente y flexible del número óptimo de atracaderos en contextos portuarios.

Al comparar estos trabajos, se puede resaltar que todos coinciden en la importancia de los modelos de teoría de colas, para optimizar recursos y reducir los tiempos de espera en sistemas portuarios. No obstante, cada uno adapta su enfoque a distintos contextos y desafíos: Budiono investiga la integración con lógica difusa para ofrecer mayor flexibilidad y manejo de prioridades, utilizando en este caso modelos de IA; Grzelakowski & Karaś recalcan la conexión entre la eficiencia operativa y los costos económicos en terminales europeas, mientras que Boixadé valida la utilidad práctica del modelo utilizando datos reales, subrayando la necesidad de ajustar la infraestructura según la demanda observada.

La literatura de estos últimos diez años muestra que el uso de modelos de colas avanzados

y las metodologías híbridas es una tendencia creciente en la gestión portuaria internacional, lo que permite optimizar la asignación de recursos y mejorar la eficiencia de los terminales. Sin embargo, todavía existen diversos desafíos para adaptar estos modelos a contextos latinoamericanos y a las particularidades de los puertos de la región, lo que justifica la necesidad de investigaciones aplicadas al ámbito ecuatoriano.

1.4.3 Elementos de teoría de colas aplicados al sistema portuario

En el presente estudio se aplicarán los modelos G/G/c, los cuáles se caracterizan por tener múltiples servidores que atienden en paralelo, donde las llegadas de los clientes siguen una distribución general, los tiempos de servicio también siguen una distribución general y el número de servidores se representa mediante la constante c .

Los procesos de nacimiento y muerte, según lo explicado por (Gross et al., 2008) en Fundamentals of Queueing Theory, constituyen un caso particular de las cadenas de Markov en tiempo continuo, ampliamente utilizados para modelar sistemas de colas. En este marco, el nacimiento representa la llegada de un nuevo cliente o entidad al sistema, mientras que la muerte corresponde a la finalización del servicio y la salida de un cliente. La característica esencial de estos procesos es que las transiciones solo pueden ocurrir entre estados adyacentes, incrementando o disminuyendo en una unidad el número de entidades en el sistema. Este enfoque permite obtener soluciones en estado estable mediante el análisis balanceado de probabilidades de transición entre estados, facilitando la evaluación del rendimiento del sistema.

En este contexto, las disciplinas de cola determinan el orden en que los clientes o entidades son atendidos dentro del sistema. Las más comunes incluyen FIFO (Primero en

entrar, primero en salir), LIFO (Último en entrar, primero en salir), SIRO (Servicio en orden aleatorio) y prioridades, donde ciertos clientes reciben atención preferencial. Estas disciplinas, también descritas por (Gross et al., 2008), afectan directamente el comportamiento y desempeño del sistema, por lo que su elección es fundamental en el diseño y análisis de modelos de colas.

En cuanto al entorno de aplicación, es necesario entender qué se considera un puerto marítimo. Según la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante (BOE, 2011), un puerto marítimo se define como el conjunto de espacios terrestres, aguas marítimas e instalaciones que, ubicados en la ribera del mar o de las rías, reúnen las condiciones físicas, naturales o artificiales, y de organización necesarias para permitir operaciones de tráfico portuario. Esta definición es clave, ya que en ella se enmarca el sistema logístico a analizar.

Dentro del puerto, se distinguen dos zonas principales en el proceso de ingreso vehicular: la zona de Pre-Gate y la zona de Gate. La primera corresponde al espacio físico previo al ingreso formal al puerto, donde se realiza la revisión de la cabina del conductor y otros elementos del vehículo. La segunda, conocida como zona de Gate, es donde se efectúan operaciones como el pesaje y la revisión del contenedor, tanto en su ingreso como en su salida.

Uno de los indicadores más relevantes para analizar el desempeño del sistema es el tiempo de atención, entendido como el lapso desde que un vehículo ingresa a la calle designada para el acceso al puerto hasta que concluye el proceso en la zona de Gate. Este indicador permite detectar y evaluar la eficiencia de las soluciones propuestas.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque Metodológico General

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo; con el objetivo de analizar y proponer soluciones para aliviar el flujo vehicular en la sección Pre-Gate del puerto por medio del uso de modelos matemáticos y herramientas de simulación.

Debido a la naturaleza operativa del problema, caracterizado por la congestión del punto de ingreso vehicular, se optó por aplicar la teoría de colas y la simulación discreta de eventos como base metodológica. Estas herramientas permitieron representar y analizar los procesos involucrados, considerando la variabilidad en la llegada y atención de vehículos.

Para alimentar los modelos se utilizaron datos reales proporcionados por la administración del puerto, los cuales incluían registros de ingreso de vehículos, tiempos de atención y horarios operativos correspondientes al periodo comprendido entre enero de 2024 y junio de 2025. El análisis se realizó mediante técnicas estadísticas y el lenguaje de programación R.

2.2 Formulación de Alternativas de Solución

Con el objetivo de optimizar el sistema de ingreso vehicular al puerto, se formularon distintas alternativas basadas en configuraciones del sistema de colas, que representan

variaciones en el número de servidores en cada etapa de los procesos Pre-Gate y Gate. Estas alternativas permiten evaluar el impacto de la capacidad de atención en cada nodo y su efecto sobre los tiempos de espera y la congestión vehicular.

Las alternativas consideradas, gracias a los límites físicos del espacio disponible en la entrada al puerto, son las siguientes:

- **Alternativa 1:** Sistema con configuración $G/G/4 \rightarrow G/G/2$, donde el nodo Pre-Gate cuenta con 4 servidores y el nodo Gate cuenta con 2 servidores.
- **Alternativa 2:** Sistema con configuración $G/G/5 \rightarrow G/G/2$, donde el nodo Pre-Gate cuenta con 5 servidores y el nodo Gate cuenta con 2 servidores.
- **Alternativa 3:** Sistema con configuración $G/G/5 \rightarrow G/G/4$, donde el nodo Pre-Gate cuenta con 5 servidores y el nodo Gate cuenta con 4 servidores.

Estas alternativas fueron evaluadas mediante simulación estocástica utilizando datos históricos para definir las distribuciones de tiempos de llegada y servicio. Los resultados permitieron comparar los indicadores tiempos promedio de espera, longitud de colas y utilización del sistema para identificar la configuración óptima que minimice la congestión y mejore la eficiencia operativa del puerto.

2.3 Descripción y Selección de la Mejor Alternativa

La selección de la mejor alternativa se basó en los siguientes criterios:

- **Reducción de tiempos promedio:** Se busca minimizar los tiempos de espera que un camión permanece en cada fase, así como el tiempo total en el sistema.

- **Control del tamaño promedio de la cola:** La alternativa seleccionada debe garantizar que el tamaño promedio de la cola no supere un umbral máximo predefinido, optimizando así la fluidez del ingreso vehicular.
- **Viabilidad física:** Se debe evaluar si el espacio físico disponible permite implementar el aumento en la cantidad de servidores.
- **Capacidad ante demanda anormal:** La alternativa debe ser capaz de mantener un nivel aceptable de servicio incluso si ocurre un aumento temporal de la demanda o algún evento que altere los tiempos de atención.

La selección de la mejor alternativa se realizó con base en los resultados obtenidos de las simulaciones de cada escenario propuesto.

Con los indicadores calculados, se compararon las alternativas siguiendo el procedimiento:

1. Se analizaron los resultados de simulación para cada criterio.
2. Se contrastaron los valores con los umbrales establecidos.
3. Se asignó una ponderación a cada alternativa según su desempeño.
4. Se identificó la alternativa que presentó el mejor balance entre eficiencia operativa y factibilidad.

2.4 Diseño Conceptual del Sistema Propuesto

En la solución propuesta, se realizó una evaluación del sistema actual utilizando un modelo en serie cuyo nodo 1 se constituye de la forma $G/G/c$ y el nodo 2 de la forma $G/G/c$, lo que permitió identificar etapas críticas de congestión en el proceso de atención. A partir de estos hallazgos, se

planteó una estructura más eficiente que permita reducir los tiempos de espera, en cuyo escenario, se aumente la capacidad de almacenar un camión en cola y el número de servidores que atiende al servicio de Pre-Gate.

2.5 Diseño Detallado y Metodología Aplicada

Mediante la modelación y simulación estocástica del sistema de ingreso vehicular en la terminal portuaria, se representó el flujo de camiones desde su llegada hasta la finalización de los procesos de Pre-Gate y Gate, sin asumir distribuciones clásicas para los tiempos de llegada y atención, además de utilizar datos históricos reales para replicar el comportamiento actual y las alternativas.

Se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones empíricas obtenidas de los datos históricos con las distribuciones de Poisson para llegadas y exponencial para los tiempos de servicio. Como se observa en el capítulo 3, este método permitió determinar si los datos seguían los supuestos Markovianos de la teoría de colas u optar por un enfoque basado en distribuciones empíricas.

El sistema opera bajo condiciones normales de servicio, sin considerar eventos extraordinarios como paros, fallas técnicas o desastres naturales.

Los datos históricos proporcionados son representativos del comportamiento general y condiciones operativas del puerto durante el período analizado.

No se incluye la influencia de factores externos como condiciones climáticas o variaciones en la demanda fuera del rango histórico.

La disciplina de la cola se definió bajo la política FIFO. La simulación consideró además parámetros críticos como el número de servidores, capacidad máxima de cola y tiempos promedio

de servicio, que fueron ajustados según los datos reales y los objetivos de mejora planteados.

Se empleó simulación estocástica para modelar el sistema de colas con múltiples servidores utilizando el software R en su entorno RStudio, aprovechando la librería *simmer*, especializada en la simulación de procesos de eventos discretos. Esta librería permite modelar las llegadas y tiempos de servicio basados en distribuciones empíricas extraídas de datos reales, facilitando la modelación detallada del flujo vehicular en las etapas de Pre-Gate y Gate. La simulación se usó para evaluar diferentes configuraciones y validar el impacto de la propuesta de ampliación del sistema.

2.6 Consideraciones Éticas y Legales

La información utilizada para la modelación del sistema fue proporcionada por la administración del puerto y corresponde a registros operativos generales (tiempos de atención, volúmenes de llegada de vehículos, capacidad actual del Pre-Gate). Todos los datos fueron tratados de forma agregada, sin identificar a personas o vehículos específicos, respetando los principios de confidencialidad y ética en el manejo de información.

La propuesta respeta las normativas laborales y de tránsito vigentes, sin modificar las condiciones contractuales del personal. Sin embargo, se reconoce que la solución óptima propuesta implica una expansión física del área de acceso, lo cual conlleva la necesidad de ocupar zonas urbanas colindantes actualmente habitadas.

El rediseño del sistema busca reducir la congestión en la entrada del puerto mediante la expansión del área de espera vehicular. Esta expansión requiere el desplazamiento de una zona urbana próxima, por lo que el impacto no solo es operativo, sino también social. Se reconoce que este cambio implica desafíos éticos y legales, como la necesidad de reubicación de viviendas o

expropiación, que deben ser abordados por las autoridades competentes bajo marcos normativos justos, transparentes y participativos, procurando minimizar el perjuicio a los habitantes afectados y garantizar compensaciones adecuadas.

2.7 Estrategia de Identificación y Análisis Causal

Mediante un análisis estadístico de los registros históricos del sistema de ingreso vehicular al puerto, se identificaron patrones recurrentes de congestión, tanto en su frecuencia como en los horarios en los que esta se presentaba con mayor intensidad. La modelación del sistema actual bajo el esquema de una serie de colas permitió evidenciar el nivel de carga que enfrenta actualmente. Esto permitió establecer una relación directa entre la estructura actual del ingreso y los tiempos de espera excesivos en el Pre-Gate, señalando la capacidad de atención insuficiente como causa principal del problema.

2.8 Descripción de Variables

A continuación se presentan las variables que actúan en el estudio:

1. Número de servidores: Número que representa la cantidad de garitas disponibles atendiendo simultáneamente en la Pre-Gate o en la Gate.
2. Tasa de llegada: Cantidad promedio de vehículos que llegan a la cola de la Pre-Gate por hora. Las unidades de esta cantidad se miden en vehículos por hora.
3. Tiempo medio entre-llegadas: Tiempo promedio que existe al medir el tiempo de diferencia de la llegada de un camión con la anterior llegada del otro camión. Esta cantidad se mide en minutos.

4. Tasa de servicio: Cantidad promedio de vehículos que son atendidos tanto en la Pre-Gate como en la Gate, respectivamente con un valor diferente, por hora. Dicha cantidad se mide en vehículos por hora.
5. Tiempo medio de servicio: Tiempo promedio en el que un camión tarda en ser servido tanto en la Pre-Gate como en la Gate, respectivamente con un valor diferente. Dicha cantidad se mide en minutos.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis Exploratorio de los Datos

Los datos utilizados provienen de los registros administrativos del puerto y comprenden dos conjuntos principales:

- Registro de ingresos de vehículos: Corresponde al periodo comprendido entre enero de 2024 y junio de 2025, con información detallada sobre los tiempos de llegada, salida y número de servidores activos en cada momento.
- Tiempos de servicio de Gate: Registra la duración del proceso de atención a cada vehículo y corresponde a un trimestre, comprendido entre junio de 2024 y septiembre de 2024.

En total, se recibieron aproximadamente 200,000 registros brutos. Estos fueron sometidos a un proceso de depuración para eliminar valores incompletos o atípicos.

En primera instancia, se depuraron los datos eliminando registros incoherentes, tales como diferencias de tiempo negativas o intervalos excesivamente grandes que superaban un día completo de espera, los cuales no resultan consistentes con la dinámica real del sistema y podrían sesgar los resultados del análisis.

Para el tratamiento de valores atípicos en los parámetros de llegada y servicio, se aplicó

un criterio de truncamiento con el fin de garantizar la coherencia del modelo. En el caso de los tiempos de llegada, se estableció un límite máximo de 60 minutos, ya que el análisis de promedios horarios evidenció que el puerto registro de mínimo ocho camiones por hora en condiciones normales, lo que hace altamente improbable que se presenten intervalos de llegada superiores a dicho umbral. Este procedimiento permitió depurar la información, evitando que registros aislados distorsionaran los resultados y asegurando que el sistema no se reinicie por la presencia de tiempos excesivos. De manera análoga, en los tiempos de servicio se adoptó un tope similar, con el propósito de restringir la influencia de eventos poco representativos o situaciones atípicas que no reflejan la operación regular del sistema. En ambos casos, este proceso metodológico de depuración asegura que las métricas obtenidas correspondan a un escenario realista y útil para la toma de decisiones.

Tras este proceso, se trabajó finalmente con 69,000 registros válidos.

Estos registros contenían, entre otras, las siguientes columnas relevantes para el análisis:

- Hora de entrada a la calle designada para que los camiones ingresen al puerto.
- Hora de llegada al proceso de Pre-Gate.
- Hora de llegada al servicio de Gate.
- Hora de salida del servicio de Gate.

La hora de entrada a la calle fue considerada como el momento de llegada del vehículo al sistema. A partir de esta información, se calcularon los tiempos de inter-llegada. Para los tiempos de servicio de cada etapa, se empleó la diferencia entre la hora de llegada al servicio y la hora de salida del mismo. En el caso del Pre-Gate, el tiempo de servicio se calculó como la diferencia

entre la hora de llegada a esta etapa y la hora de llegada al Gate, dado que la distancia entre ambas es corta y no representa un incremento significativo en el tiempo de servicio.

La Tabla 3.1 presenta las estadísticas descriptivas principales —media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo— para cada variable de interés.

Tabla 3.1.

Estadísticas descriptivas de las variables principales

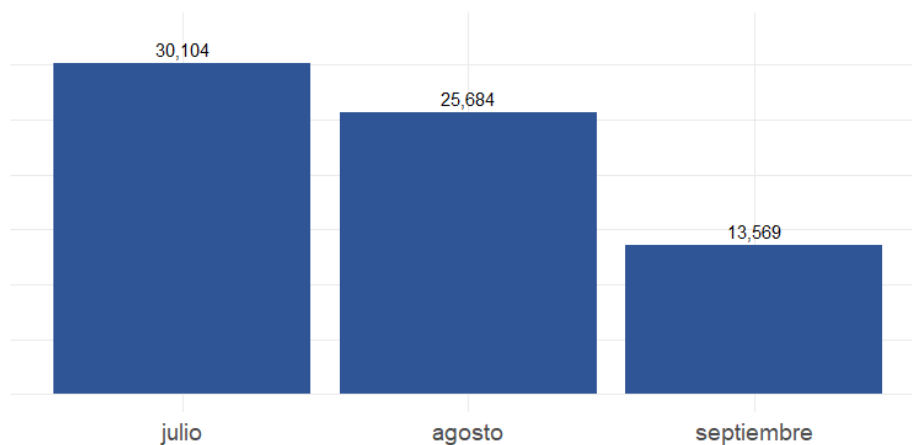
Variable	Media	Mediana	Desv. Est.	Mínimo	Máximo
Tiempo entre llegadas (min)	1.80	1.00	3.27	0.00	59.00
Tiempo de servicio Pre-Gate (min)	2.86	1.00	8.07	0.00	59.00
Tiempo de servicio Gate (min)	0.90	1.00	1.27	0.00	52

El análisis muestra que el tiempo promedio entre llegadas es menor que el tiempo promedio de servicio, tanto en Pre-Gate como en Gate, lo cual sugiere una tendencia a la acumulación de vehículos en estas etapas.

Además, se observa que la variabilidad de los tiempos de servicio en Pre-Gate es mayor y más dispersa que la de los tiempos entre llegadas de los camiones, lo que contribuye al aumento y la formación de colas en este punto del proceso.

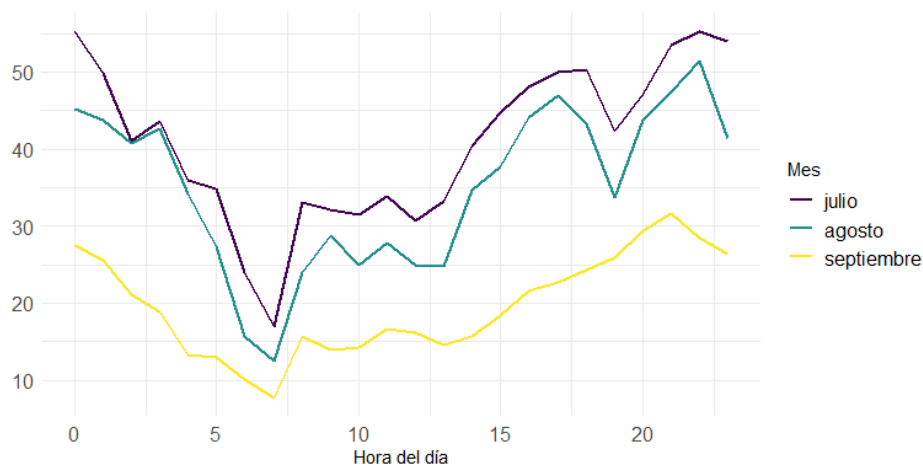
Se realizó un análisis del volumen de vehículos que ingresan a la terminal por la entrada seleccionada, obteniéndose los resultados que se visualizan en la Figura 3.1

Figura 3.1.
Frecuencia mensual del ingreso de camiones al puerto



Considerando el período analizado de tres meses, se obtuvo una media de 23,125 camiones mensuales, lo que equivale aproximadamente a 770 camiones diarios que son atendidos en el ingreso del puerto.

Figura 3.2.
Distribución promedio de vehículos ingresados por hora del día y por mes



Además, el análisis en la Figura 3.2 refleja los horarios con mayor promedio de recepción de camiones por hora, evidenciando que en cada intervalo horario se registra un flujo mínimo de

vehículos. Esto permite identificar las horas de mayor demanda y, al mismo tiempo, garantiza que incluso en los periodos de menor actividad se mantiene un nivel de arribo relevante para el sistema.

3.2 Evaluación de Ajuste de Distribuciones

3.2.1 Tiempos de Inter-llegadas

Los tiempos de inter-llegada de camiones fueron ajustados a distintas distribuciones paramétricas (Exponencial, Gamma, Weibull y Lognormal) con el objetivo de determinar si siguen un proceso de Poisson o presentan comportamientos más generales. En la Figura 3.3 se muestra la comparación entre la distribución empírica y los modelos teóricos evaluados.

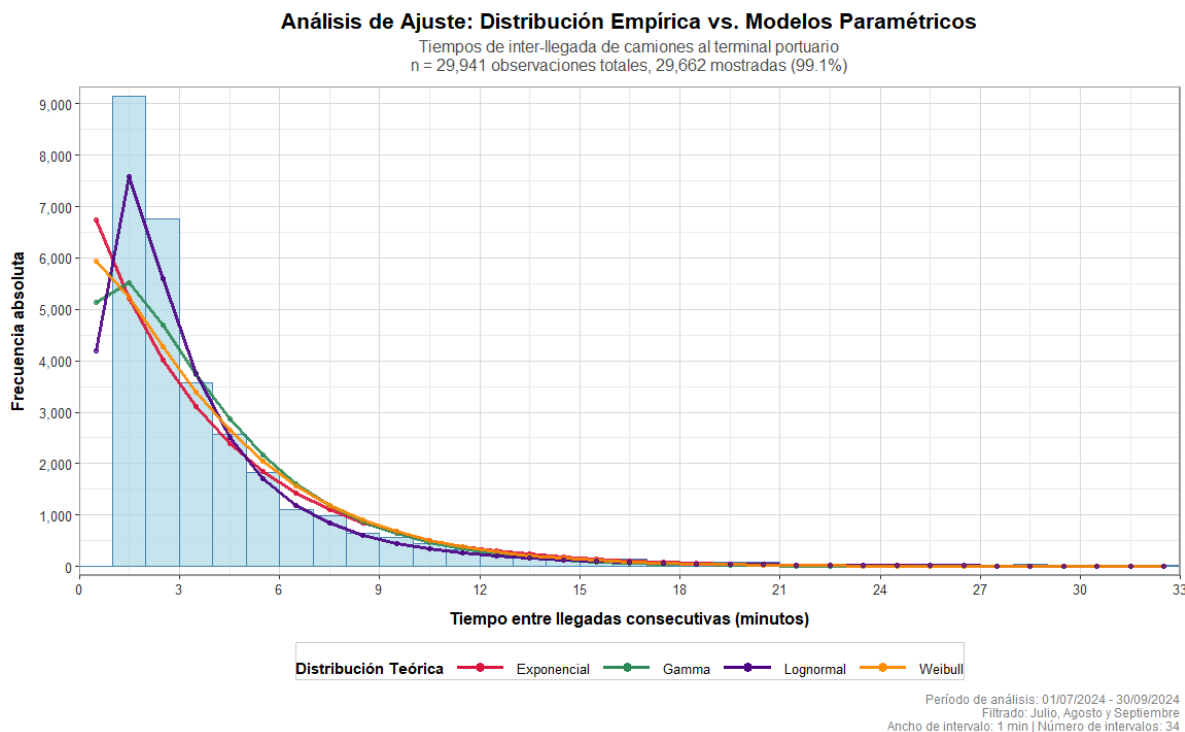


Figura 3.3.

Análisis de ajuste de los tiempos de inter-llegada: comparación entre distribución empírica y modelos paramétricos (Exponencial, Gamma, Lognormal y Weibull).

Adicionalmente, se calculó el criterio de información de Akaike (AIC) para cuantificar la bondad de ajuste de cada modelo. Los resultados se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.

Resultados de bondad de ajuste (AIC) para los modelos de tiempos de inter-llegada.

Distribución	AIC
Exponencial	139488.6
Gamma	137670.3
Weibull	138972.7
Lognormal	130559.9

Los resultados obtenidos sobre la variable Tiempos de Inter-Llegadas muestran que la distribución lognormal presenta el menor valor de AIC, lo cual indica que es el modelo que mejor describe la variabilidad de los tiempos de inter-llegada. En contraste, la distribución exponencial presenta el mayor valor de AIC, confirmando que la suposición de llegadas de tipo Poisson no es adecuada para este sistema. Tanto la distribución Gamma como la distribución Weibull ofrecen un ajuste intermedio, aunque menos eficiente que la distribución lognormal. Estos hallazgos justifican dar un supuesto de que las llegadas se las analice mediante distribuciones generales (no Markovianas), como la distribución lognormal, a la cual los datos de llegadas aparentemente se ajustan mejor.

El análisis de las pruebas de bondad de ajuste formales (Kolmogorov-Smirnov) evidenció que se mostraron valores de $p < 0.001$, lo que conduce al rechazo del supuesto de que los datos siguen exactamente una distribución lognormal. Este contraste es atribuible al tamaño muestral elevado ($n \approx 30,000$), que hace que incluso pequeñas discrepancias entre la distribución teórica y la empírica resulten estadísticamente significativas.

En consecuencia, se concluye que, si bien la lognormal constituye la mejor aproximación entre los modelos paramétricos probados, no logra capturar de forma completa la variabilidad observada. Por ello, para la etapa de simulación se optó por utilizar directamente la distribución empírica de los tiempos de inter-llegada, asegurando una representación más fiel del comportamiento real del sistema.

3.2.2 *Tiempos de servicio en Pre-Gate*

Los tiempos de servicio en la etapa de Pre-Gate fueron ajustados a distintas distribuciones paramétricas (Exponencial, Gamma, Weibull y Lognormal) con el objetivo de identificar el modelo que mejor representa su comportamiento. En la Figura 3.4 se muestra la comparación entre la distribución empírica y los modelos evaluados.

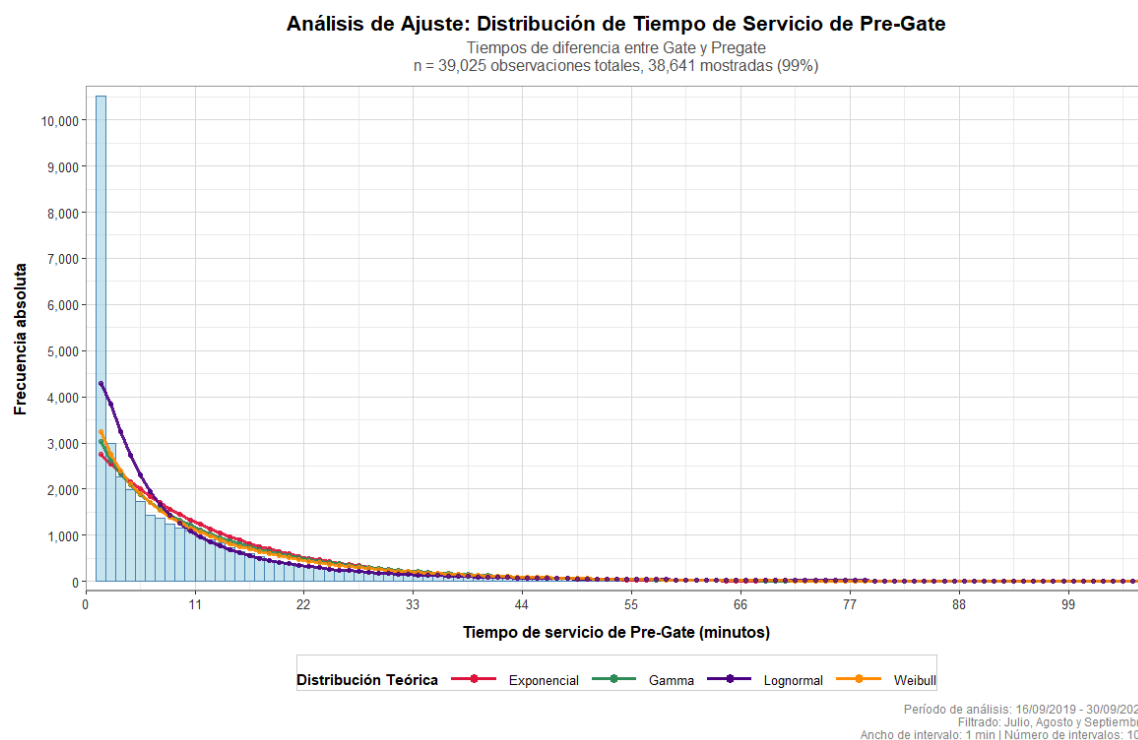


Figura 3.4.
Ajuste de los tiempos de servicio en Pre-Gate: comparación entre distribución empírica y modelos paramétricos (Exponencial, Gamma, Lognormal y Weibull).

Para cuantificar la bondad de ajuste relativa se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC). Los resultados se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.
Resultados de bondad de ajuste (AIC) para los modelos de tiempos de servicio en Pre-Gate.

Distribución	AIC
Exponencial	271744.1
Gamma	271017.9
Weibull	270100.8
Lognormal	265333.2

Los resultados presentados sobre la variable Tiempos de Servicio de Pre-Gate muestran que la distribución lognormal presenta el menor valor de AIC, lo cual indica que es el modelo que mejor describe la variabilidad de los tiempos de servicio en Pre-Gate. En contraste, la distribución exponencial presenta el valor más alto, descartando el supuesto markoviano. Tanto la Gamma como la Weibull ofrecen un ajuste intermedio, pero menos eficiente que la lognormal.

Sin embargo, al aplicar la prueba de Kolmogorov-Smirnov para contrastar la hipótesis nula de que los datos provienen exactamente de una distribución lognormal, se obtuvo un estadístico $D = 0.0963$ con un p -valor menor a 2.2×10^{-16} . Esto lleva al rechazo de la hipótesis nula, lo cual implica que, aunque la lognormal sea la mejor aproximación paramétrica, no captura de forma completa la variabilidad de los datos. Cabe destacar que el tamaño muestral elevado ($n \approx 39,000$) hace que incluso pequeñas discrepancias resulten estadísticamente significativas.

En consecuencia, se concluye que la distribución lognormal constituye la mejor aproximación entre las opciones paramétricas, pero no representa fielmente toda la dispersión observada. Por ello, para la etapa de simulación se optó por utilizar la distribución empírica de los tiempos de servicio en Pre-Gate, garantizando una representación más realista del comportamiento del sistema.

3.2.3 *Tiempos de servicio en Gate*

Los tiempos de servicio en la etapa de Gate fueron ajustados a distintas distribuciones paramétricas (Exponencial, Gamma, Weibull y Lognormal) con el objetivo de identificar el modelo que mejor representa su comportamiento. En la Figura 3.5 se muestra la comparación entre la distribución empírica y los modelos evaluados.

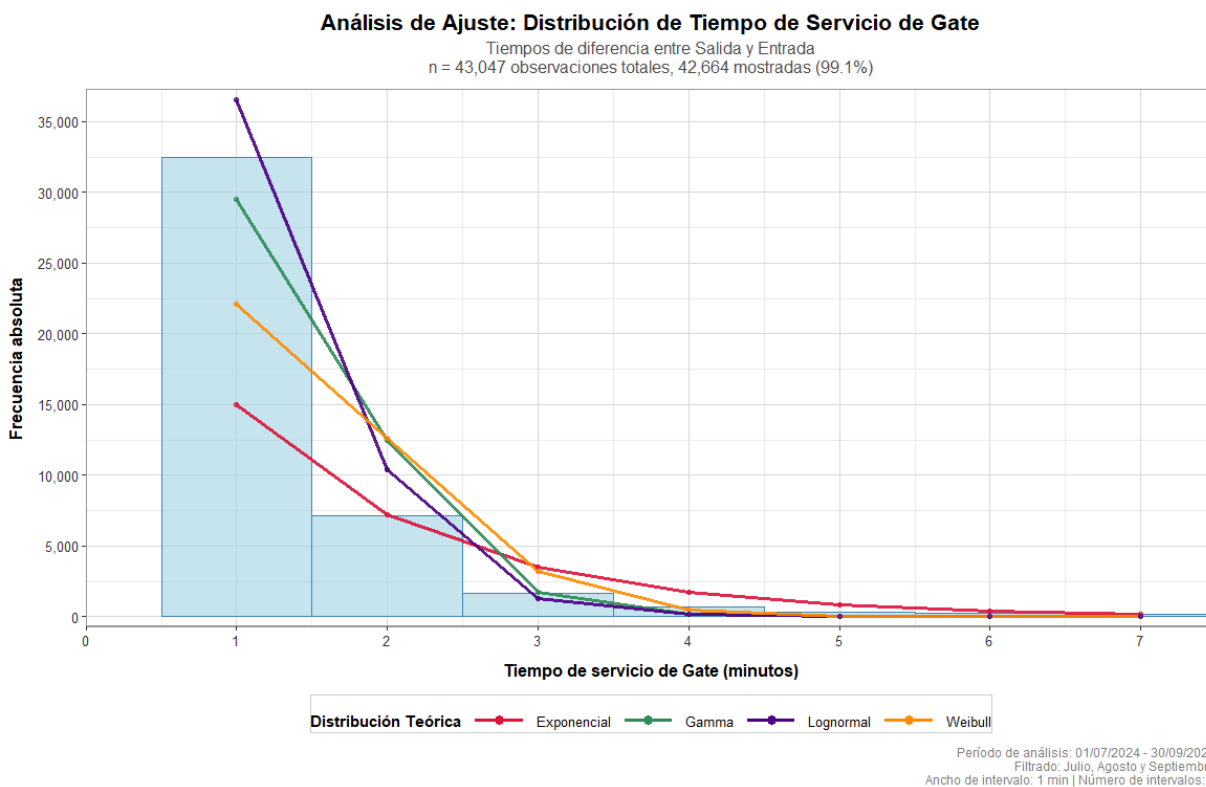


Figura 3.5.
Ajuste de los tiempos de servicio en Gate: comparación entre distribución empírica y modelos paramétricos (Exponencial, Gamma, Lognormal y Weibull).

Para cuantificar la bondad de ajuste relativa se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC). Los resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4.
Resultados de bondad de ajuste (AIC) para los modelos de tiempos de servicio en Gate.

Distribución	AIC
Exponencial	112479.74
Gamma	74827.19
Weibull	88786.87
Lognormal	62418.29

Los resultados obtenidos respecto a la variable Tiempos de Servicio de Gate muestran que la distribución lognormal presenta el menor valor de AIC, lo cual indica que es el modelo que mejor describe la variabilidad de los tiempos de servicio en Gate. En contraste, la distribución exponencial presenta el valor más alto, descartando el supuesto markoviano. Gamma y Weibull ofrecen un ajuste intermedio, pero menos eficiente que la lognormal.

Se aplicó la prueba de Kolmogorov–Smirnov para contrastar la hipótesis nula de que los datos provienen exactamente de una distribución lognormal con los parámetros estimados; se obtuvo un estadístico $D = 0.4581$ con $p\text{-valor} < 2.2 \times 10^{-16}$, por lo que se *rechaza* la hipótesis nula. Cabe notar la advertencia por *ties* en el KS debido a la discretización temporal (medición por minutos); no obstante, el tamaño muestral elevado ($n \approx 43,000$) hace que discrepancias pequeñas resulten estadísticamente significativas.

En consecuencia, aunque la lognormal constituye la mejor aproximación paramétrica (AIC mínimo), no captura por completo la variabilidad observada. Por ello, para la etapa de simulación se utilizó la distribución empírica de los tiempos de servicio en Gate, asegurando una representación más fiel del sistema real.

3.3 Modelación y Simulación

El modelo fue desarrollado bajo un enfoque de teoría de colas, representando el sistema actual mediante una red en tándem compuesta por dos estaciones de servicio: la primera modelada como un esquema G/G/3 (Pre-Gate, con tres servidores habilitados en paralelo bajo condiciones normales) y la segunda como un esquema G/G/2 (Gate, con dos servidores operativos). Este escenario constituye la línea base sobre la cual se compararon posteriormente las alternativas planteadas en la Sección 2.2, que consideran configuraciones con diferente

número de servidores. Los parámetros de llegada y servicio fueron simulados a partir de datos históricos.

La simulación se ejecutó bajo las condiciones operativas observadas en el sistema real, con el objetivo de reproducir su comportamiento promedio y evaluar las métricas clave de desempeño.

- Tiempo promedio y máximo de espera en las etapas de Pre-Gate y Gate.
- Longitud promedio y máxima de la cola en ambas etapas.
- Utilización de los servidores en cada etapa.

Los resultados obtenidos permitieron identificar cuellos de botella y evaluar su capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda.

El análisis mostró que las métricas simuladas se encuentran dentro de un rango aceptable de error respecto a las observaciones reales, confirmando que el modelo captura adecuadamente la dinámica del sistema.

Algoritmo 1 Simulación del sistema de Pre-Gate y Gate

Entrada: Tiempo de simulación T , número de servidores en Pre-Gate c_p , número de servidores en Gate c_g

1: Inicializar entorno de simulación

2: Definir funciones aleatorias:

$f_{llegadas} \leftarrow$ saca una muestra de las llegadas históricas

$f_{servicio_pregate} \leftarrow$ saca un tiempo de servicio en Pre-Gate

$f_{servicio_gate} \leftarrow$ saca tiempo de servicio en Gate

3: Ejecutar Definición de la trayectoria de cada camión

▷ Llama al Algoritmo 2

4: Definir recursos del sistema:

c_p servidores en Pre-Gate con cola infinita

c_g servidores en Gate con cola infinita

5: Generar camiones según $f_{llegadas}$

6: Ejecutar simulación hasta tiempo T

7: Recolectar información:

Tiempos de llegada y salida

Atributos de cada camión

Estado de los recursos

8: Unir datos y calcular:

Espera en Pre-Gate

Espera en Gate

Salida: Resultados de llegadas y recursos utilizados

Algoritmo 2 Definición de la trayectoria de cada camión

- 1: Llegar al ingreso del Puerto
 - 2: Ocupar un servidor en Pre-Gate
 - 3: Esperar $f_servicio_pregate$
 - 4: Liberar servidor en Pre-Gate
 - 5: Ocupar un servidor en Gate
 - 6: Esperar $f_servicio_gate$
 - 7: Liberar servidor en Gate
-

Algoritmo 3 Ejecución repetida de la simulación

Entrada: Número de repeticiones N , servidores en Pre-Gate c_p , servidores en Gate c_g , tiempo de simulación T

- 1: Inicializar lista de resultados vacía

for $i = 1$ **to** N **do**
 - 2: Ejecutar algoritmo 1(T, c_p, c_g)
 - 3: Obtener tablas de:
 - Recursos
 - Llegadas
 - 4: Agregar columna de iteración con valor i
 - 5: Guardar resultados en listas**end**
- 6: Unir todas las tablas de recursos en una sola
- 7: Unir todas las tablas de llegadas en una sola

Salida: Arribos y Recursos

3.4 Resultados Objetivo 1

El primer objetivo planteado consistió en caracterizar el sistema de atención vehicular actualmente implementado en la terminal, con el fin de identificar sus principales parámetros operativos y describir su comportamiento bajo las condiciones reales de operación.

Para ello, se analizaron los registros de llegadas y tiempos de servicio de los camiones durante el período de estudio, lo que permitió estimar las tasas de llegada y servicio correspondientes. Posteriormente, se modeló el sistema como una red en tándem conformada por dos estaciones de servicio: la primera representada por un sistema G/G/3 y la segunda por un sistema G/G/2, lo cual refleja la configuración actual de la terminal. Adicionalmente, el espacio físico disponible para la formación de colas en la zona de espera es limitado, con capacidad aproximada para 18 camiones.

Para caracterizar el sistema actual, se calcularon tres métricas que describen el desempeño de las estaciones de servicio Pre-Gate y Gate. A continuación, se presentan los valores obtenidos:

3.5 Resultados Objetivo 2

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados correspondientes a los parámetros del sistema. Se realizó un análisis detallado de los tiempos entre llegadas de los vehículos al ingreso del puerto, así como de las diferencias temporales entre las distintas etapas de servicio, con el fin de caracterizar de manera precisa el comportamiento operativo del sistema y sentar las bases para la modelación mediante teoría de colas.

Tabla 3.5.*Parámetros del sistema actual por servicio*

Parámetro	Pre-Gate	Gate
Tasa de llegada λ (veh/h)	33.43	33.43
Tiempo medio entre llegadas (min)	1.80	1.80
Tasa de servicio μ (veh/h)	20.97	67.27
Tiempo medio de servicio (min)	2.86	1.44

3.6 Resultados Objetivo 3

Para la representación del modelo actual se empleó el paquete de simulación simmer en R. Se realizaron 300 simulaciones, cada una correspondiente a un día completo de operación del sistema de ingreso de camiones. A partir de dichas simulaciones se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales permiten analizar el comportamiento del sistema bajo las condiciones actuales.

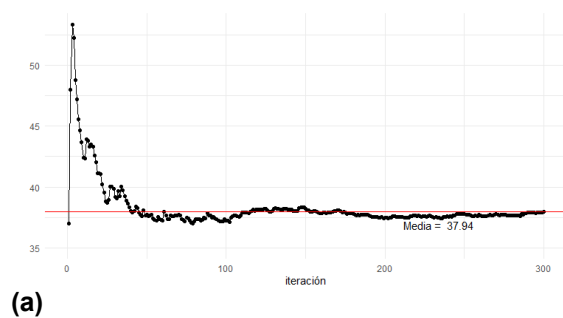
En la simulación se estableció que los tres parámetros fundamentales del sistema —tiempo entre llegadas, tiempo de servicio en Pre-Gate y tiempo de servicio en Gate— se consideren en un rango de 0 a 60 minutos. Esta decisión se justifica en que, al analizar los registros de llegadas por cada hora del día, se observa que en promedio siempre se recibe un flujo constante de camiones en cada hora, lo que permite representar el sistema de forma adecuada en intervalos de una hora. Adicionalmente, los casos extremos de atención que superan dicho rango se presentan con muy baja frecuencia, por lo que fueron descartados al no tener un impacto significativo en la dinámica global del sistema.

3.6.1 Tamaño de la cola del sistema

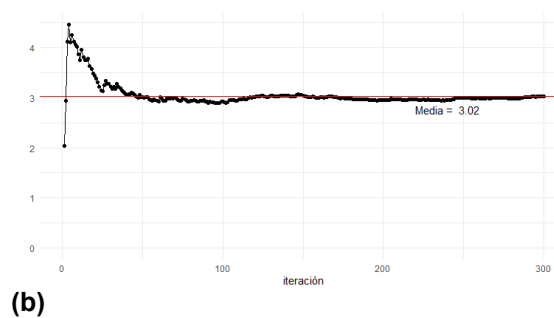
En la Figura 3.6 se presenta la evolución de la media de los máximos y de los promedios de la cola a medida que se incrementa el número de simulaciones, mostrando cómo este valor converge hacia un límite estable.

Figura 3.6.

Comportamiento del tamaño de cola del sistema al aumentar las simulaciones



Media de los cola máxima del sistema



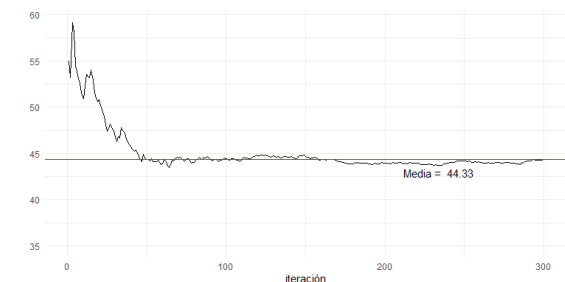
Media de los cola media del sistema

3.6.2 Tiempos de espera en el sistema

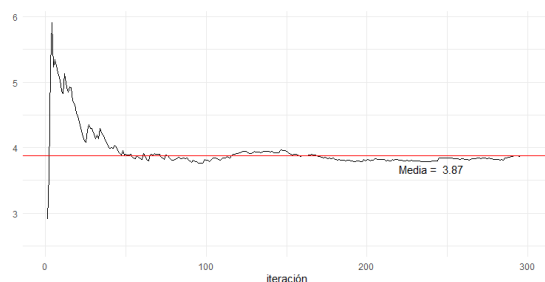
En la Figura 3.7 se presenta la evolución de la media de los máximos y los promedios de los tiempos de espera a medida que se incrementa el número de simulaciones, mostrando cómo este valor converge hacia un límite estable.

Figura 3.7.

Comportamiento de la media de los tiempos de espera del sistema al aumentar las simulaciones

**(a)**

Media de los tiempos de espera máximo del sistema

**(b)**

Media de los tiempos de espera medios del sistema

3.6.3 Utilización del sistema

La Tabla 3.6 presenta la tasa de utilización de los servidores en la configuración actual del sistema.

Tabla 3.6.

Utilización de los servidores en la configuración actual

Parámetro	Pre-Gate	Gate
Utilización del servicio	53.12%	40.22%

3.7 Resultados Objetivo 4

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las distintas configuraciones propuestas del modelo de colas, con el fin de evaluar su desempeño frente a los tres indicadores definidos: la longitud de las colas, los tiempos de espera y la utilización del servicio. Estos resultados permiten comparar escenarios alternativos y determinar cuáles ofrecen un mejor equilibrio entre eficiencia operativa y capacidad de atención en el sistema de

ingreso de camiones de la empresa portuaria.

3.7.1 Utilización del sistema

Tabla 3.7.

Utilización de los servidores comparando las diferentes configuraciones

Parámetro	Pre-Gate	Gate
Pre-Gate = 3 y Gate = 2	53.12%	40.22%
Pre-Gate = 4 y Gate = 2	39.84%	40.22%
Pre-Gate = 5 y Gate = 2	31.87%	40.22%
Pre-Gate = 5 y Gate = 4	31.87%	20.10%

En la Tabla 3.7 se observa una utilización adecuada del sistema que permite evitar la formación descontrolada de colas y, al mismo tiempo, garantiza un uso eficiente de los servidores actuales. Conforme se incrementa el número de servidores, la utilización disminuye a valores más favorables, lo que contribuye a reducir la probabilidad de congestión y, en consecuencia, el tamaño máximo de las colas, como se mostrará en el apartado 3.7.2.

En el caso de los nodos Gate, se evidencia una reducción significativa de la utilización al aumentar en dos el número de servidores, lo que refleja una mejora en la capacidad de atención y una disminución de la presión sobre el sistema.

No obstante, cabe señalar que valores excesivamente bajos de utilización pueden generar situaciones de ociosidad en los servidores, lo que implicaría un uso ineficiente de los recursos disponibles.

Estos resultados reflejan que un mayor número de servidores distribuye mejor la carga de trabajo, aunque a costa de una menor utilización individual, lo que implica un balance entre

eficiencia operativa y aprovechamiento de los recursos.

3.7.2 Tamaño de la cola del sistema

Tabla 3.8.

Promedios y Máximos de la cola por cada configuración del sistema

Parámetro	Media	Máximo
Pre-Gate = 3 y Gate = 2	4	38
Pre-Gate = 4 y Gate = 2	1	24
Pre-Gate = 5 y Gate = 2	1	17
Pre-Gate = 5 y Gate = 4	1	11

En la Tabla 3.8 se observa que al incrementar la capacidad en el Pre-Gate a 4 servidores y mantener 2 en Gate, la cola promedio se reduce a 1 camión, mientras que el máximo desciende a 24 camiones. Aunque se observa una mejora respecto al escenario inicial, este máximo aún supera la capacidad disponible, lo que indica que el sistema puede seguir presentando bloqueos en momentos de alta demanda.

En la configuración con Pre-Gate = 5 y Gate = 2, el tamaño promedio de la cola se mantiene en 1 camión, y el máximo disminuye a 17 camiones, valor que se encuentra dentro del límite físico del sistema. Esto evidencia un mejor equilibrio entre la capacidad de servicio y el espacio de espera. Finalmente, en el escenario con Pre-Gate = 5 y Gate = 4, se obtiene el desempeño más favorable, con un promedio de 1 camión y un máximo de 11 camiones, muy por debajo del límite permitido, asegurando que el sistema funcione de manera estable y sin bloqueos externos.

Tabla 3.9.*Promedios y Máximos de los tiempos de espera por cada configuración del sistema*

Parámetro	Media (min)	Máximo (min)
Pre-Gate = 3 y Gate = 2	4	45
Pre-Gate = 4 y Gate = 2	1	25
Pre-Gate = 5 y Gate = 2	1	15
Pre-Gate = 5 y Gate = 4	1	11

3.7.3 Tiempos de espera en el sistema

En la Tabla 3.9 se observa que al incrementar la capacidad en el Pre-Gate a 4 servidores y mantener en 2 los servidores en Gate, el tiempo promedio de espera se reduce drásticamente a 1 minuto, y el tiempo máximo baja a 25 minutos, mostrando una mejora significativa frente al escenario inicial.

Cuando se considera la configuración con Pre-Gate = 5 y Gate = 2, el tiempo promedio permanece en 1 minuto, mientras que el tiempo máximo disminuye a 15 minutos, lo que representa una reducción importante de la congestión. Finalmente, la configuración con Pre-Gate = 5 y Gate = 4 presenta el mejor desempeño, manteniendo un tiempo de espera promedio de 1 minuto y reduciendo el máximo a 11 minutos, garantizando un flujo más eficiente y estable en el sistema.

3.7.4 Estabilidad de los promedios y máximos en la simulación

Se realizaron múltiples simulaciones para analizar el comportamiento del sistema en términos de tamaño de cola y tiempos de espera. La Figura 3.8 muestra la evolución del tamaño máximo de la cola, la Figura 3.9 muestra la evolución del tamaño promedio de la cola. De manera similar, la Figura 3.10 presenta la evolución de los tiempos máximos de espera, mientras

que la Figura 3.11 ilustra los tiempos medios de espera. En todos los casos, se observa que las métricas tienden a estabilizarse a medida que aumenta el número de simulaciones, permitiendo obtener valores representativos para la toma de decisiones de dimensionamiento del sistema.

Figura 3.8.

Comparación de las longitudes máximas de cola entre configuraciones

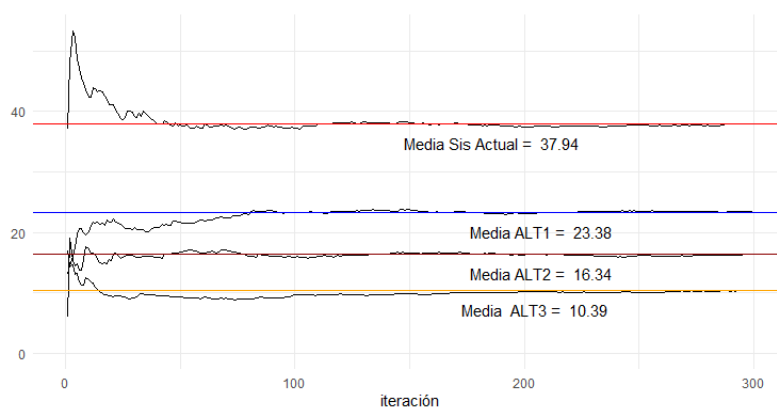


Figura 3.9.

Comparación de las longitudes medias de cola entre configuraciones

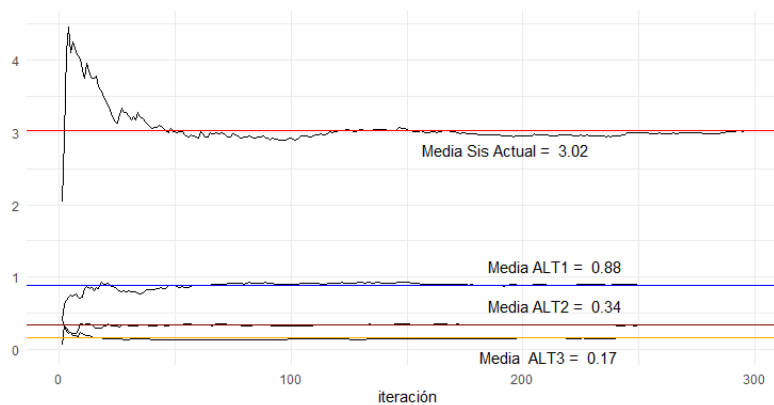
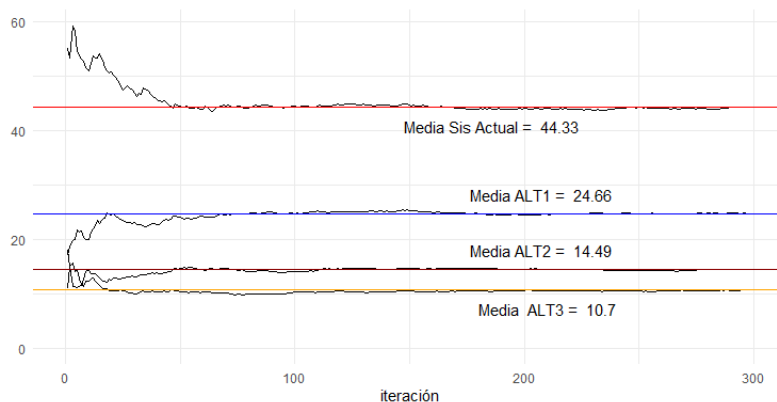
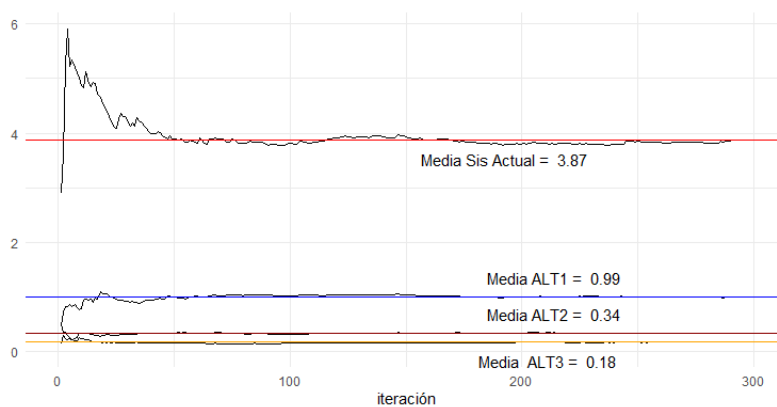


Figura 3.10.

Comparación de los tiempos de espera maximos en el sistema entre configuraciones

**Figura 3.11.**

Comparación de los tiempos de espera medios en el sistema entre configuraciones



3.8 Limitaciones y Observaciones

Las principales limitaciones y observaciones identificadas en el desarrollo del estudio son las siguientes:

- Supuestos del modelo: El sistema se representó como una red de colas G/G/3 y G/G/2, lo cual captura adecuadamente la dinámica principal, pero simplifica ciertas variaciones reales en los tiempos de llegada y servicio que pueden darse por factores externos como el clima,

el tráfico, procesos internos o fallos en el sistema de ingresos.

- Capacidad de la cola: Se supuso un espacio de espera de aproximadamente 18 camiones, lo que constituye una restricción física importante. Sin embargo, el modelo no contempla de manera detallada el impacto de los bloqueos en la red vial externa una vez que se supera este límite.
- Horizonte de datos: Los parámetros de llegada y servicio se estimaron con base en registros históricos. En la práctica, estos pueden variar en función de la época del año, días pico o eventos logísticos no considerados en el período analizado.
- Resultados de la simulación: Los valores promedio y máximos obtenidos son representativos y se estabilizan con la convergencia de las simulaciones. No obstante, en escenarios reales, pueden presentarse desviaciones ante cambios abruptos en la demanda o interrupciones en el servicio.
- Observación general: A pesar de estas limitaciones, los resultados muestran tendencias claras que permiten comparar alternativas de configuración y evaluar el impacto de los servidores en el control de colas y tiempos de espera.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo se distingue por el uso de datos históricos reales de llegadas y tiempos de servicio de camiones en el puerto, lo que permite modelar el sistema con un nivel de precisión y aplicabilidad. A diferencia de los modelos teóricos tradicionales que suponen distribuciones simplificadas, se simuló el sistema considerando colas ilimitadas y distribuciones empíricas, lo que permite estimar el tamaño máximo que podría alcanzar la cola en caso de incrementos en la demanda y evaluar los impactos en los tiempos de espera y la eficiencia operativa.

Además, la investigación aporta propuestas concretas de mejora operativa y de diseño físico, basadas en la comparación de múltiples configuraciones de servidores y en los resultados de simulaciones convergentes. Esto incluye recomendaciones sobre la reorganización del espacio de trabajo de los servidores, ajustes en la configuración de Pre-Gate y Gate, y mejoras en la toma de datos para registrar con mayor precisión los tiempos de servicio. Estas aportaciones permiten no solo validar y optimizar la operación actual del puerto, sino también generar un marco de referencia práctico para futuras mejoras o estudios similares en otros sistemas logísticos.

Conclusiones

Conclusión 1

En el análisis del sistema actual se evidenció que los servidores presentan un buen nivel de utilización, lo que indica que no se desaprovecha su capacidad. Sin embargo, el tamaño máximo de la cola supera el espacio físico disponible para la espera de camiones, lo que puede generar congestión externa. Además, los tiempos de espera máximos alcanzan valores significativos cuando se forman colas grandes, lo cual puede resultar perjudicial para la eficiencia de los procesos operativos de la terminal.

Conclusión 2

El aumento del número de servidores permitió mejorar los tiempos de espera y reducir el tamaño máximo de las colas; sin embargo, no existe un diseño que permita que más de cuatro servidores operen eficientemente en el Pre-Gate bajo la configuración actual. Esta limitación dificulta la implementación de configuraciones con mayor número de servidores. Por ello, se sugiere un rediseño del espacio físico que contemple tanto el área de trabajo de los servidores como un espacio de espera para los camiones, garantizando que la capacidad de almacenamiento sea suficiente para cubrir el tamaño máximo esperado de la cola en la configuración deseada.

Recomendaciones

Recomendación 1

Se sugiere reorganizar el espacio físico destinado a los ingresos del puerto para que permita implementar la configuración deseada de servidores. En particular, si se considera la opción de 4 servidores en el Pre-Gate y 2 en el Gate, el diseño debe contemplar un área que permita a los cuatro servidores operar de manera continua sin interferencias, así como un espacio de espera para los camiones que sea mayor al tamaño máximo de cola estimado en esta configuración, garantizando la fluidez del sistema y evitando congestión externa.

Recomendación 2

Se recomienda mejorar la toma de datos incluyendo en los registros el momento de finalización del servicio en el Pre-Gate. Esto permitirá contar con información más precisa sobre los tiempos de servicio en este punto, facilitando un análisis más detallado de la eficiencia operativa y permitiendo realizar simulaciones y evaluaciones de desempeño más confiables para futuras mejoras del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- (2011). Real decreto legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de puertos del estado y de la marina mercante. *Boletín Oficial del Estado*. Disponible en <https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-16467-consolidado.pdf>.
- Abril Lopera, P. V. and Franco Mendoza, J. L. (2022). Mejora en la atención al cliente a través de la teoría de colas. caso: Distribuidora el hueco s.a.s. Trabajo de grado, Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Arévalo, B. (2017). Estudio de servicios portuarios dentro de la autoridad portuaria de esmeraldas (sector servicios portuarios).
- Boixadé, M. (2018). Aplicación de la teoría de colas en la mejora del funcionamiento de una terminal portuaria: el caso portcemen, puerto de barcelona. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Budiono, A. (2016). The development of a queuing model for optimization of seaport facilities at tanjung perak seaport, indonesia. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(6):93–100.
- Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., and Harris, C. M. (2008). *Fundamentals of Queueing Theory*. Wiley, Hoboken, NJ, 4 edition.

Grzelakowski, A. S. and Karaś, A. (2022). Queueing theory as an instrument of optimization operational and economic sphere of port terminals: Case study. *LogForum*, 18(3):345–355.

Ortiz Chang, J. R. (2024). Aplicación de un modelo de teoría de colas en garitas de acceso de transporte pesado en un recinto portuario.

Singer, M., Donoso, P., and Scheller-Wolf, A. (2008). Una introducción a la teoría de colas aplicada a la gestión de servicios. *Revista ABANTE*, 11(2):93–120. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139021> (consultado el 23/6/2025).

APÉNDICES

APÉNDICE A

A.1 Código de Simulación en R

```
1 #=====
2 #Funcion de la simulacion
3 #=====
4 simular_varias_veces <- function(tiempo, serv_pregate, serv_gate){
5
6   env <- simmer("Puerto")
7
8   # Convertimos a funciones aleatorias
9   f_llegadas <- function() sample(llegadas, 10000)
10  f_servicio_pregate <- function() sample(servicio_pregate, 1)
11  f_servicio_gate <- function() sample(servicio_gate, 1)
12
13  # Definir la trayectoria de cada camion con registro de tiempos
14  trayectoria <- trajectory("camion") %>%
15    # ----- PREGATE -----
16    set_attribute("llegaCola_pregate", function() simmer::now(env)) %>% #
17      marca_llegada_a_cola
18    seize("servidor_pregate", 1) %>%
19    set_attribute("inicio_serv_pregate", function() simmer::now(env)) %>% #
20      marca_inicio_servicio
```

```

19     timeout(f_servicio_pregate) %>%
20     release("servidor_pregate", 1) %>%
21
22     # ----- GATE -----
23     set_attribute("llegaCola_gate", function() simmer::now(env)) %>%      #
24         llegada a cola gate
25     seize("servidor_gate", 1) %>%
26     set_attribute("inicio_serv_gate", function() simmer::now(env)) %>%    #
27         inicio servicio gate
28     timeout(f_servicio_gate) %>%
29     release("servidor_gate", 1)
30
31     # Definir los recursos
32     env %>%
33     add_resource("servidor_pregate", capacity = serv_pregate, queue_size =
34         Inf) %>%
35     add_resource("servidor_gate", capacity = serv_gate, queue_size = Inf)
36         %>%
37     add_generator("camion", trayectoria, at(cumsum(f_llegadas()))) , mon =
38         2)
39
40     # Ejecutar simulacion
41     env %>% simmer::run(until = tiempo)
42
43     # Extraer resultados

```

```

39 arrivals <- env |> get_mon_arrivals()
40 attrs <- env |> get_mon_attributes()
41 resources <- env |> get_mon_resources()
42
43 # Pasar atributos a formato ancho
44 attrs_wide <- attrs %>%
45   dplyr::select(name, key, value) %>%
46   pivot_wider(names_from = key, values_from = value)
47
48 # Unir y calcular tiempos de espera
49 resultados <- arrivals %>%
50   left_join(attrs_wide, by = "name") %>%
51   mutate(
52     espera_pregate = inicio_serv_pregate - llega_cola_pregate,
53     espera_gate = inicio_serv_gate - llega_cola_gate
54   )
55   return(list(resultados,resources))
56 }
57
58
59 #funcion para tabla resultados y resources
60 ejecutar_varias_veces_tabla_resource <- function(n_veces, serv_pregate,
61   serv_gate, minutos_simular) {
62   resultados <- lapply(1:n_veces, function(i) {

```

```

62     res <- simular_varias_veces(minutos_simular, serv_pregate, serv_gate)
        # Ejecuta la funcion
63     tabla_re <- res[[1]]      # Extrae tabla resources
64     tabla_arriva <- res[[2]]
65     tabla_re$iteracion <- i   # Agrega columna con el numero de corrida
66     tabla_arriva$iteracion <- i
67     return(list(tabla_re, tabla_arriva))
68 }
69 )
70
71 # Extraer todas las tabla_re y tabla_arri
72 lista_re <- lapply(resultados, `[[`, 1)
73 lista_arri <- lapply(resultados, `[[`, 2)
74
75 # Unirlas en una sola tabla
76 tabla_final_re <- dplyr::bind_rows(lista_re)
77 tabla_final_arri <- dplyr::bind_rows(lista_arri)
78
79 return(list(tabla_final_re, tabla_final_arri))
80 }

```

Código A.1. Simulación del modelo en tandem G/G/c para el puerto