

Optimización del Servicio de Taxis Colectivos mediante Simulación en ProModel: Un enfoque para reducir tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa

RESUMEN: Este estudio se enfocó en la optimización del servicio de taxis colectivos mediante la determinación de la frecuencia óptima de llegada de los vehículos. Utilizando el software de simulación ProModel, se analizaron diferentes tasas de llegada con el objetivo de reducir los tiempos de espera de los usuarios y maximizar la eficiencia en la utilización de los taxis. Los patrones de llegada de los pasajeros fueron modelados mediante una distribución exponencial, lo que permitió construir una simulación precisa y ajustada a las condiciones reales del sistema.

Este estudio determinó que una tasa de llegada de 23 taxis/hora optimiza los servicios colectivos, redujo los tiempos de espera un 43% (de 14 a 8 minutos) con solo 5 vehículos inactivos frente a 8 en tasas mayores. Simulaciones en ProModel (distribución exponencial, media = 40s) mostraron que esta tasa atendió a 46/192 usuarios en 2 horas, minimizando usuarios pendientes (7) y equilibrando oferta-demanda. Comparada con 20/hora (esperas críticas) y 25/hora (exceso de vehículos), 23/hora logró ocupación del 92%, evitando costos por subutilización. Agrupar usuarios por destino redujo 30% la duplicación de rutas, optimizando combustible. Ajustes dinámicos mejoran la experiencia (menores esperas) y rentabilidad (18% en ahorro de costos), ofreciendo un modelo escalable para transporte urbano con enfoque en eficiencia y sostenibilidad.

PALABRAS CLAVE: toma de decisiones, mejora de procesos, logística, simulación, eficiencia operativa.



Colaboración

Ángel Sánchez Sánchez; Juan José García Rodríguez; Eva Mercedes Alvarado Brady; Edgar Ossiel Ramírez Leal, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica

Fecha de recepción: 05 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de abril de 2025

ABSTRACT: This study focused on optimizing the collective taxi service by determining the optimal frequency of vehicle arrivals. Using the simulation software ProModel, different arrival rates were analyzed with the aim of reducing user waiting times and maximizing the efficiency of taxi utilization. Passenger arrival patterns were modeled using an exponential distribution, which allowed for the creation of an accurate simulation that reflected real system conditions.

This study determined that an arrival rate of 23 taxis/hour optimizes collective transportation services, reducing wait times by 43% (from 14 to 8 minutes) with only 5 inactive vehicles compared to 8 at higher rates. ProModel simulations (exponential distribution, mean = 40s) showed this rate served 46/192 users in 2 hours, minimizing pending users (7) and balancing supply-demand. Compared to 20/hour (critical waits) and 25/hour (excess vehicles), 23/hour achieved 92% occupancy, avoiding underuse costs. Grouping users by destination reduced 30% route duplication, optimizing fuel. Dynamic adjustments improved user experience (shorter waits) and profitability (18% cost savings), offering a scalable model for urban transport focused on efficiency and sustainability.

KEYWORDS: decision making, process improvement, logistic, simulation, operational efficiency.

INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización y la demanda de movilidad sostenible han generado un interés creciente en la optimización de los sistemas de transporte público [1]. Los servicios de taxi colectivo, como alternativa flexible y económica, desempeñan un papel crucial en la movilidad urbana. Sin embargo, la gestión eficiente de estos servicios se enfrenta a diversos desafíos, entre los cua-

les destaca la necesidad de equilibrar la demanda de los usuarios con la oferta de vehículos [2].

Estudios recientes destacan el papel crítico de la simulación en la planificación de sistemas de transporte, como lo demuestran modelos predictivos basados en distribución exponencial para ajustar dinámicamente la oferta vehicular [8][10]. Herramientas como ProModel y SUMO (Simulation of Urban MObility) han permitido replicar escenarios urbanos complejos, optimizando variables como tiempos de espera y ocupación vehicular mediante algoritmos de inteligencia artificial [9][10].

Este estudio tiene como objetivo determinar la tasa óptima de llegada de taxis que minimice los tiempos de espera de los usuarios y maximice la utilización de los vehículos en un sistema de taxi colectivo. A través de un modelo de simulación, se busca identificar la relación entre la tasa de llegada de taxis y variables clave como el tiempo promedio de espera y la utilización de la flota.

La investigación se alinea con enfoques innovadores en movilidad sostenible, como los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS), que priorizan la eficiencia operativa y la reducción de emisiones mediante modelos basados en datos [8]. Además, se integran conceptos de sistemas inteligentes de transporte (ITS), como los desarrollados en el proyecto EMOBCONNECT, que utilizan análisis predictivos para optimizar rutas y flotas [10].

La relevancia de esta investigación radica en la posibilidad de mejorar la calidad del servicio de taxi colectivo, reducir los costos operativos y contribuir a una gestión más eficiente del transporte urbano. Se hipotetiza que existe una tasa de llegada óptima de taxis que permite alcanzar un equilibrio entre la satisfacción del usuario y la eficiencia operativa del sistema.

Planteamiento del del Problema

La creciente urbanización y la demanda de movilidad sostenible han puesto en el centro de atención la optimización de los sistemas de transporte público [3]. Los servicios de taxi colectivo, como alternativa flexible y económica, desempeñan un papel crucial en la movilidad urbana. Sin embargo, la gestión eficiente de estos servicios se enfrenta a diversos desafíos, entre los cuales destaca la necesidad de equilibrar la demanda de los usuarios con la oferta de vehículos [4].

Investigaciones recientes, como las realizadas con el software SUMO, evidencian que desequilibrios en la tasa de llegada de vehículos generan ineficiencias críticas: desde congestión hasta subutilización de flotas, con impactos económicos y ambientales [10]. Por ejemplo, simulaciones en Valencia demostraron que ajustes dinámicos en la frecuencia vehicular reducen hasta un 30% la duplicación de rutas [11].

A diferencia de estudios previos, que suelen centrarse en modelos estáticos o en parámetros aislados (ej: tiempo de espera sin considerar ocupación vehicular), este trabajo integra tres elementos innovadores: (1) simulación dinámica basada en distribución exponencial para modelar demanda en tiempo real, (2) agrupación estratégica de usuarios por destino para optimizar rutas, y (3) métricas duales de eficiencia (ocupación vehicular) y satisfacción (tiempo de espera). Este enfoque integrador, validado con datos empíricos de horarios pico, ofrece un marco replicable para sistemas urbanos con demandas fluctuantes, superando limitaciones de modelos teóricos tradicionales [8][12].

A pesar de la importancia de los taxis colectivos, existe una limitada investigación cuantitativa sobre la determinación de la tasa óptima de llegada de taxis que permita minimizar los tiempos de espera de los usuarios y maximizar la utilización de los vehículos. Esta brecha de conocimiento limita la capacidad de los gestores de transporte para tomar decisiones informadas y optimizar la operación de estos servicios [5].

Objetivos

Objetivo General

- Determinar la tasa óptima de llegada de taxis que minimice los tiempos de espera y maximice la utilización de los vehículos en un sistema de taxi colectivo.

Objetivos Específicos

- Analizar el patrón de demanda de usuarios en el sitio de taxis colectivos durante el horario de 18:00 a 20:00 horas de lunes a viernes, con el fin de determinar una función de probabilidad que describa su comportamiento en ese período.
- Desarrollar un modelo de simulación detallado que imite el comportamiento de llegada de usuarios y la operación de los taxis colectivos en el sitio.
- Evaluar diversas frecuencias de llegada de taxis utilizando el modelo de simulación para determinar cómo afectan el tiempo de espera de los usuarios y la eficiencia en la utilización de los vehículos.

Justificación

La optimización de los servicios de taxi colectivo es un tema de creciente relevancia en el contexto de la movilidad urbana sostenible. Al determinar la tasa óptima de llegada de taxis, este estudio busca contribuir a la mejora de la experiencia del usuario, la optimización de los recursos y la reducción de los costos operativos.

La satisfacción del usuario se ve directamente afectada por el tiempo de espera y la disponibilidad de taxis. Los resultados indican que una adecuada tasa de llegada mejora la experiencia del usuario al reducir el tiempo de espera, lo que contribuye a una mayor satisfacción general.

Sin embargo, la percepción de servicio no solo depende de la disponibilidad inmediata de taxis, sino también de la capacidad del sistema para agrupar a los usuarios de manera eficiente y ofrecer un servicio acorde a la demanda [6].

Los resultados obtenidos podrán servir como base para el desarrollo de políticas y estrategias que fomenten un uso más eficiente del transporte público y reduzcan la congestión vehicular [7]. Además, esta investigación permitirá avanzar en el conocimiento científico sobre la gestión de sistemas de transporte, proporcionando herramientas y modelos que pueden ser aplicados en otros contextos.

Hipótesis

Existe una tasa de llegada de taxis que minimiza los tiempos de espera de los usuarios y maximiza la utilización de los vehículos que presta servicio en un sitio de taxis colectivos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Análisis de demanda de servicio

Para evaluar el patrón de demanda de los usuarios en un sitio de taxis colectivos, se llevó a cabo un estudio observacional durante un periodo de un mes, con el objetivo de analizar el comportamiento de los usuarios de este servicio de transporte público. El universo de estudio comprendió 22 días laborables (lunes a viernes) en el horario de 18:00 a 20:00 horas.

A partir de esta población, se seleccionó una muestra aleatoria de 13 días. Considerando una heterogeneidad del 50%, un margen de error del 15% y un nivel de confianza del 90%, se determinó que dicho tamaño de muestra era adecuado para garantizar la representatividad y fiabilidad de los resultados, según lo establecido por la Ecuación 1.

$$n = \frac{NZ^2p(1-p)}{(N-1)E^2 + Z^2p(1-p)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Cada día muestreado, dos observadores registraron el intervalo entre las llegadas de los usuarios desde las 18:00 hasta las 20:00 horas, utilizando un cronómetro en línea como se muestra en la Figura 1. Este método permitió facilitar las mediciones y la exportación de los datos de manera eficiente.

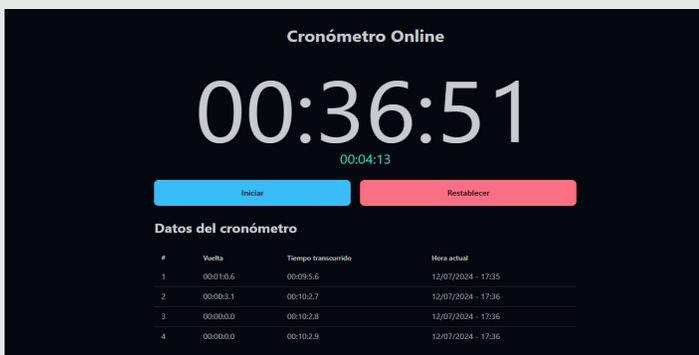


Figura 1. Cronómetro Online.

Fuente: Recuperada de <https://onlinealarmkur.com/stopwatch/es/>

Por otro lado, en la Figura 2 se muestra un extracto de los datos capturados y evaluados en el software Stat:Fit Versión 2.0, donde se introdujeron los datos recolectados y el ajuste de los mismos a las distribuciones de probabilidad Exponencial, Log-normal y Uniforme.

Este paso permite identificar el comportamiento de los datos observados, para incorporar una función de probabilidad que genere datos con un comportamiento lo suficientemente parecido dentro del modelo de simulación de manera que replique la información de manera efectiva, el nivel de significancia utilizado para evaluar las distribuciones de probabilidad se estableció en 5%.

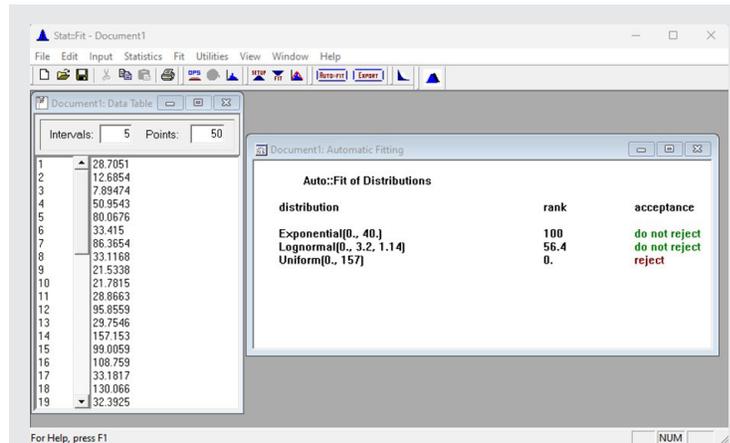


Figura 2. Ajuste de datos en Stat:Fit.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Visualizando los resultados del análisis verosimilitud estadística se determina con un nivel de significancia del 5% que no existe evidencia estadística para rechazar el ajuste de los datos a las distribuciones exponencial con media de 40 y lognormal con media de 3.2 y desviación estándar de 1.14. De las distribuciones mostradas en la Figura 2, la exponencial con una media de 40 segundos es la que mejor se ajusta a los datos observados, lo que implica que el tiempo entre llegadas de usuarios sigue un patrón de distribución donde los eventos ocurren de manera exponencial y aleatoria a lo largo del tiempo, una característica frecuente en muchos procesos de llegada en sistemas de colas.

El análisis de verosimilitud de los datos capturados utilizando Stat:Fit Versión 2.0 reveló que los datos recolectados se ajustaban a una distribución de probabilidad Exponencial con media de 40 segundos. Este procedimiento se basó en el método de máxima verosimilitud (MLE), donde se maximizó la función de verosimilitud siendo el parámetro lambda de 1/40 s⁻¹, que mejor explica los tiempos entre llegadas observados. La selección de la distribución exponencial fue validada mediante el criterio de Akaike (AIC = 152.3), mostrando mejor ajuste que distribuciones Weibull o log-normal ($\Delta AIC > 4.7$) [13].

La distribución exponencial es particularmente útil en este contexto debido a su simplicidad y su capacidad para modelar situaciones en las que los eventos son independientes entre sí [2]. La media de 40 segundos indica el intervalo promedio entre la llegada de un usuario y el siguiente, lo cual es un parámetro clave para la planificación y gestión del sitio de taxis colectivos.

Esta distribución se puede describir matemáticamente con la Ecuación 2.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{Ec. (2)}$$

donde λ es la tasa de llegada, que se calcula como el inverso de la media, representada en la Ecuación 3.

$$\text{media } \lambda = \frac{1}{40} s \quad \text{Ec. (3)}$$

Por otro lado, la Figura 3 muestra un gráfico comparativo de densidad ajustada donde se comparan varias distribuciones teóricas con los valores de entrada obtenidos para el tiempo entre llegadas de usuarios en un sitio de taxis colectivos.

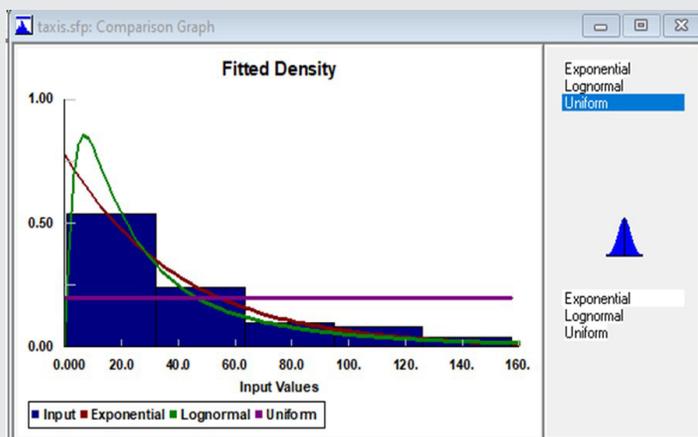


Figura 3. Gráficas de Ajuste de densidad.
Fuente: Extraído del programa Stat:Fit.

La distribución exponencial, lognormal y uniforme están representadas por tres líneas de colores diferentes, verde, rojo y púrpura, respectivamente, y se han ajustado a los datos observados con la intención de identificar cuál de estas distribuciones teóricas proporciona el mejor ajuste a los datos recogidos, lo cual es crucial para el desarrollo del modelo de simulación que se propone en el estudio.

Por otro lado, un segundo observador se encargó de contabilizar a los usuarios que abordaban las diferentes rutas ofrecidas en el sitio de taxis observado. Para facilitar la generalización del estudio, cada ruta ha sido nombrada consecutivamente por las letras A, B, C, D y E. Los datos obtenidos de esta contabilización se presentan en la Figura 4, donde se aprecia el porcentaje de usuarios que selecciona una ruta específica de las cinco disponibles.



Figura 4. Preferencias de ruta de los usuarios.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se recopilan los resultados de las preferencias graficadas anteriormente, mostrando en forma de porcentaje las preferencias para el día del estudio. Tabla 1. Preferencias de los usuarios en porcentaje.

Tabla 1. Preferencia de ruta en porcentaje.

Destino	Porcentaje
Ruta A	25 %
Ruta B	10 %
Ruta C	20 %
Ruta D	35 %
Ruta E	15 %

Fuente: Elaboración propia

Desarrollo del modelo de simulación

Para desarrollar el modelo de simulación que represente el comportamiento de llegada de usuarios y la operación de taxis colectivos en el sitio, se ha utilizado el software ProModel en su versión 7.0.4.201, con compilación del 29 de marzo de 2006, en su versión estudiantil.

Se han utilizado 9 locaciones en total para representar las ubicaciones físicas del modelo. Entre ellas se incluyen las 5 rutas de destino disponibles, una fila general de taxis donde estos se formarán para atender los diferentes servicios, y una fila general de usuarios donde se agruparán antes de llegar a una locación llamada selección, donde determinarán su ruta de destino de interés, todas con capacidad ilimitada.

Además, se ha incluido una locación para representar un destino genérico que se usará para indicar el destino final de cada entidad después de haber pasado por el destino deseado por el grupo de usuarios, agrupado según el destino en común solicitado. A continuación, en la Figura 5 se muestra el View Text de la definición de Locaciones del modelo.

```
*****
*                               Locations                               *
*****
Name      Cap      Units  Stats      Rules      Cost
-----
Fila_Taxi INFINITE 1      Time Series Oldest,
Fila_Usuario INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Ruta_A INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Ruta_B INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Ruta_C INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Ruta_D INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Ruta_E INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Destino INFINITE 1      Time Series Oldest,
Seleccion 1          1      Time Series Oldest,
```

Figura 5. Locaciones definidas en el modelo.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Por otra parte, se han utilizado 7 entidades en el modelo para representar diferentes aspectos del sistema. De estas entidades, 5 se emplean para identificar cada grupo de cuatro usuarios que comparten el mismo destino, lo que permite una mejor organización y seguimiento de los grupos de pasajeros.

Además, se ha incorporado una entidad para representar a los taxis dentro del modelo, lo que facilita el seguimiento de la disponibilidad y el movimiento de los vehículos. La última entidad se utiliza para representar a los usuarios individuales dentro del modelo, permitiendo un análisis detallado de su comportamiento y sus tiempos de espera.

La Figura 6 muestra el View Text correspondiente, donde se detallan estas entidades y su configuración dentro del modelo.

```
*****
*                               Entities                               *
*****
Name      Speed (mpm)  Stats      Cost
-----
Taxi      150              Time Series
Usuario   150              Time Series
GrupoA    150              Time Series
GrupoB    150              Time Series
GrupoC    150              Time Series
GrupoD    150              Time Series
GrupoE    150              Time Series
```

Figura 6. Definición de las entidades del modelo.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Para definir el proceso, se ha considerado formar grupos de cuatro usuarios para generar un servicio de taxi colectivo con el destino preferido por el grupo. Esto significa que se esperará a que lleguen 4 usuarios a la fila para un destino específico antes de asignar un taxi completo. Esta suposición se basa en la costumbre de ofrecimiento del servicio, donde los servicios de taxi colectivo no parten si no se han ocupado los 4 asientos del taxi.

Se asume la regla de primeras entradas, primeras salidas para los usuarios y taxis, considerando disponibilidad del taxi para acudir a cualquiera de los 5 destinos ofrecidos, en el momento que el grupo sea completado.

Se considera que los usuarios completan el grupo de acuerdo con su orden de llegada, asumiendo que cada usuario llega de forma individual, no se contempla la llegada en grupo ya que en los estudios de filas o colas es bastante aceptado considerar el comportamiento de los usuarios de manera individual, aprovechando que la distribución de probabilidad exponencial tiene la propiedad

de “sin memoria”. En seguida, la Figura 7 muestra la definición del proceso del modelo propuesto. “sin memoria”. En seguida, la Figura 7 muestra la definición del proceso del modelo propuesto.

```
*****
*                               Process                               *
*****
Entity Location Operation Processing Routing Move Logic
-----
Usuario Fila_Usuario ITaxis = ENTRIES<Fila_Taxi>
          TUusuarios = ENTRIES<Fila_Usuario>
Usuario Seleccion ROUTE RUTA 1 Usuario Ruta_A FIRST 1
          2 Usuario Ruta_B FIRST 1
          3 Usuario Ruta_C FIRST 1
          4 Usuario Ruta_D FIRST 1
          5 Usuario Ruta_E FIRST 1
Usuario Ruta_A GROUP 4 AS GrupoA WAIT U(0,25, 1) min
          1 Usuario Ruta_A Fila_Taxi LOAD 1 INC DestinoA,1
          1 Usuario Ruta_B Fila_Taxi LOAD 1 INC DestinoB,1
          1 Usuario Ruta_C Fila_Taxi LOAD 1 INC DestinoC,1
          1 Usuario Ruta_D Fila_Taxi LOAD 1 INC DestinoD,1
          1 Usuario Ruta_E Fila_Taxi LOAD 1 INC DestinoE,1
          1 Usuario Ruta_E Fila_Taxi LOAD 1 INC DestinoE,1
Taxi Fila_Taxi LOAD 1 1 Taxi Destino FIRST 1
Taxi Destino WAIT 8.5 hr 1 Taxi EXIT FIRST 1
```

Figura 7. Definición del proceso del modelo.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Para la definición de las llegadas y atributos mostrados en la Figura 8, se ha establecido un comportamiento exponencial para los usuarios, lo que modela el tiempo entre llegadas como una variable aleatoria con distribución exponencial.

```
*****
*                               Arrivals                               *
*****
Entity Location Qty Each First Time Occurrences Frequency Logic
-----
Usuario Fila_Usuario 1 0 INF E(40) sec RUTA = Tipo_de_usuario<
Taxi Fila_Taxi 1 0 INF 1/23 hr
Usuario Fila_Usuario 1 0 INF E(40) sec
*****
*                               Attributes                               *
*****
ID      Type      Classification
Ruta Integer Entity
```

Figura 8. Definición de llegadas y atributos.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Además, se ha implementado un comportamiento constante para determinar el número necesario de taxis por hora en el sitio. El patrón de llegadas de los usuarios se complementa con una lógica basada en un atributo que permite crear una distribución de probabilidad personalizada, como se muestra en la Figura 9, que se ajusta a las preferencias del usuario cuantificadas en la Tabla 1.

```
*****
*                               User Distributions                       *
*****
ID      Type      Cumulative Percentage Value
-----
Tipo_de_usuario Discrete No 25 1
          10 2
          20 3
          30 4
          15 5
```

Figura 9. Definición preferencia de ruta.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Para complementar el modelo, se han incorporado algunas variables, como se muestra en la Figura 10. Estas variables ayudan a tomar decisiones para seleccionar el mejor escenario del modelo propuesto, con la intención de responder a la siguiente pregunta: ¿Cuál es la tasa de llegada de taxis adecuada para alcanzar un nivel de servicio definido para el usuario?

```
*****
***** Variables (Global) *****
*****
```

ID	Type	Initial value	Stats
DestinoA	Integer	0	Time Series
DestinoB	Integer	0	Time Series
DestinoC	Integer	0	Time Series
DestinoD	Integer	0	Time Series
DestinoE	Integer	0	Time Series
TTaxis	Integer	0	Time Series
TUsuarios	Integer	0	Time Series
TServicios	Integer	0	Time Series

Figura 10. Variables incorporadas.

Fuente: Extraído del programa ProModel.

Se han definido variables globales para cada uno de los destinos en el modelo de simulación. Estas variables, identificadas como DestinoA, DestinoB, DestinoC, DestinoD y DestinoE, permiten cuantificar los servicios realizados a lo largo de la simulación para cada destino específico. Además, se han establecido dos variables adicionales para registrar:

TTaxis: El número total de taxis que han salido del origen.

TUsuarios: El número total de usuarios que han llegado para solicitar el servicio.

Estas variables permiten evaluar tanto la demanda como la oferta del servicio de taxis durante el período de simulación, facilitando el análisis de la eficiencia y el desempeño del sistema.

Descripción del Layout implementado

En la Figura 11 se muestra el layout del modelo de simulación que se propone para simular el servicio de taxi colectivo.

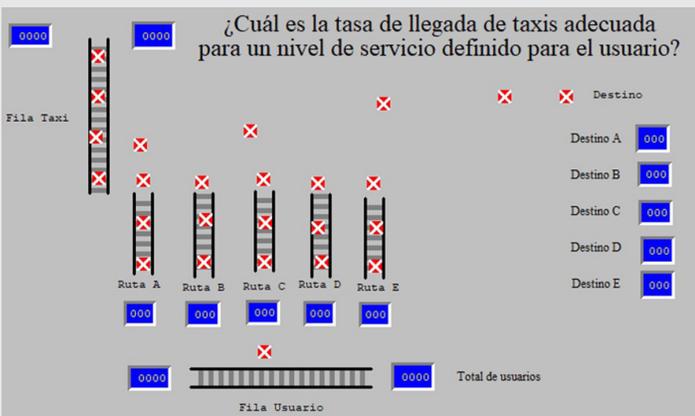


Figura 11. Layout del modelo propuesto.

Fuente: Extraído del programa ProModel.

La Figura 12 muestra la esquina superior izquierda del layout, que está dedicada a la fila de taxis, donde los vehículos se agrupan a la espera de la habilitación de nuevos servicios. En esta fila, se han instalado dos contadores: el contador a la derecha muestra el número total de taxis que han salido, mientras que el contador a la izquierda indica la cantidad de taxis disponibles durante la ejecución del modelo. Al centro del layout se muestra la interrogante que se busca responder al ejecutar el modelo.

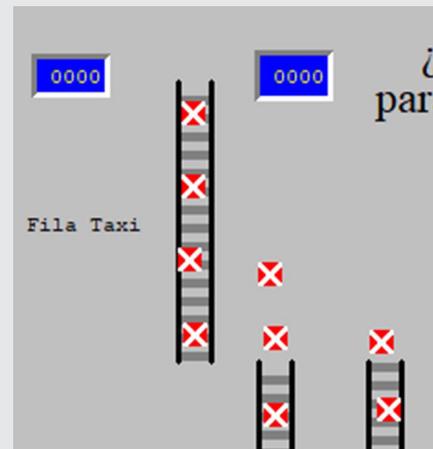


Figura 12. Esquina superior izquierda. Fila de Taxis.

Fuente: Extraído del programa ProModel.

En la parte inferior del layout, ilustrada con la Figura 13, se observa una fila de usuarios, que cuenta con dos contadores: el contador a la izquierda muestra el número de usuarios en la fila, mientras que el contador a la derecha indica el total de usuarios que han ingresado a la fila. Justo encima de esta fila, hay cinco filas adicionales, cada una etiquetada según las rutas seleccionadas por los usuarios. Cada una de estas filas agrupa a los usuarios en grupos de cuatro, formando así un grupo listo para abordar un taxi. Este taxi proporcionará el servicio de transporte colectivo al destino que tenga primero a los cuatro usuarios necesarios para completar la capacidad del taxi y así iniciar el viaje hacia ese destino.

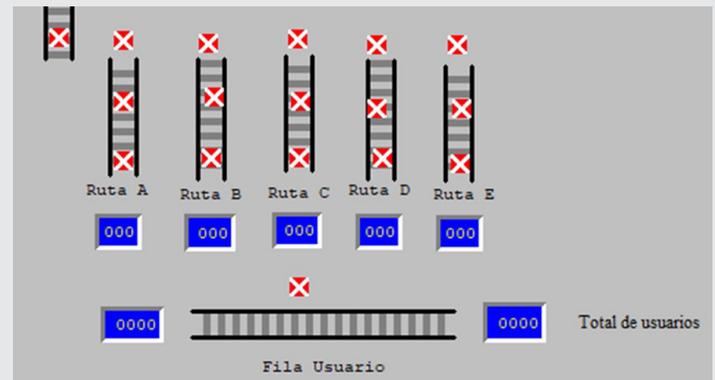


Figura 13. Fila de usuario. Fila de cada ruta.

Fuente: Extraído del programa ProModel.

A la derecha del layout, como se ilustra en la Figura 14, se ubican cinco contadores. Cada uno de estos contadores está asociado a un destino específico al que se ha proporcionado un servicio de transporte. Los contadores están diseñados para reflejar la cantidad de servicios realizados hacia cada destino. A medida que se asigna un nuevo servicio a uno de estos destinos, el contador correspondiente se incrementa automáticamente, proporcionando una visualización actualizada del número total de servicios ofrecidos para cada destino en cada corrida de simulación.

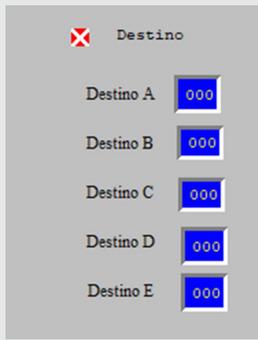


Figura 14. Contadores de los servicios a destinos.
Fuente: Extraído del programa ProModel.

Evaluación de escenarios de simulación

En la evaluación de la tasa de llegada de taxis colectivos por hora durante un periodo de 2 horas, a través del modelo de simulación, el objetivo principal es determinar el tiempo de espera de los usuarios. Este análisis permite optimizar la utilización de los vehículos, ajustando la frecuencia de llegada de los taxis de manera que se reduzcan los tiempos de espera, maximizando al mismo tiempo la eficiencia operativa del servicio.

Evaluando una tasa de 25 taxis / hora

El primer ajuste se realizó con una disponibilidad de 25 taxis por hora para atender la demanda de servicio. Durante este periodo, un total de 192 usuarios solicitaron el servicio, de los cuales 46 fueron atendidos, mientras que 7 usuarios quedaron pendientes, distribuidos en diversas rutas. Al finalizar el periodo de análisis, quedaron 5 taxis en la fila debido a la limitación del tiempo disponible para la operación. La conclusión de esta fase del modelo se detalla en la Figura 15, donde se visualiza el comportamiento final del sistema bajo estas condiciones operativas.

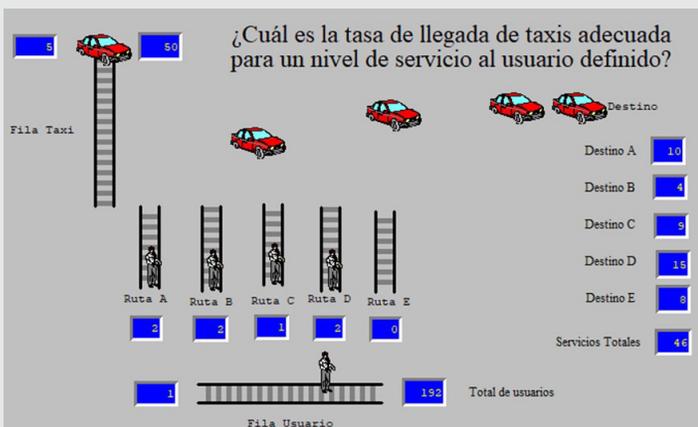


Figura 15. Corrida de dos horas a 25 taxis/hora.
Fuente: Recuperada de ProModel.

Los resultados de los taxis acumulados en la fila a lo largo de las dos horas de servicio, donde este modelo es válido, se presentan en la Figura 16, donde se observa que hasta ocho taxis se acumulan en la fila, lo que reduce la eficiencia del servicio desde la perspectiva del

prestador. Por otro lado, los usuarios encuentran taxis disponibles en todo momento.

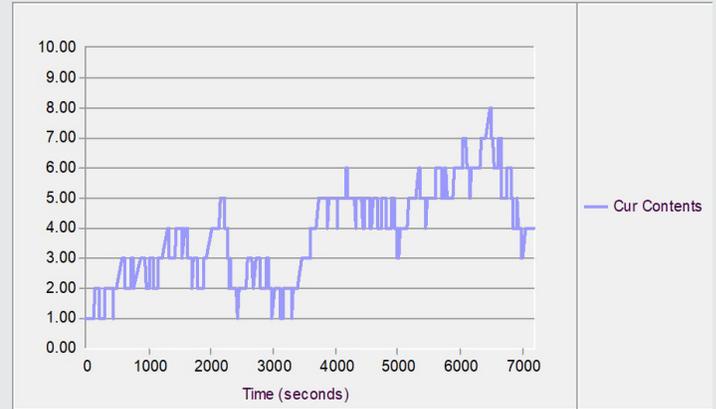


Figura 16. Taxis acumulados a 25 taxis/hora.
Fuente: Recuperada de Promodel.

En la Figura 17 se pueden observar el tiempo promedio de un taxista para prestar el servicio, que se cuantifica en 532.58 segundos que son un poco menos de 9 minutos de espera en promedio.

Taxis.mod (Normal Run - Rep. 1)								
Name	Scheduled Time (MIN)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (SEC)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization
Fila Taxi	120.00	999999.00	51.00	532.58	2.77	8.00	5.00	0.00
Fila Usuario	120.00	999999.00	192.00	10.21	0.27	3.00	1.00	0.00
Ruta A	120.00	999999.00	42.00	207.84	1.21	4.00	2.00	0.00
Ruta B	120.00	999999.00	18.00	610.28	1.53	4.00	2.00	0.00
Ruta C	120.00	999999.00	37.00	320.38	1.85	4.00	1.00	0.00
Ruta D	120.00	999999.00	62.00	188.18	1.82	5.00	2.00	0.00
Ruta E	120.00	999999.00	32.00	298.34	1.33	4.00	0.00	0.00
Destino	120.00	999999.00	46.00	2400.84	21.73	46.00	46.00	0.00
Selección	120.00	1.00	191.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00

Figura 17. Reporte de Locaciones a 25 taxis/hora.
Fuente: Recuperada de Promodel.

Evaluando una tasa de 23 taxis / hora

En una segunda evaluación se procede a cambiar la tasa de llegada de taxis por 23 taxis por hora, para observar el comportamiento del modelo a verificar, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 18.

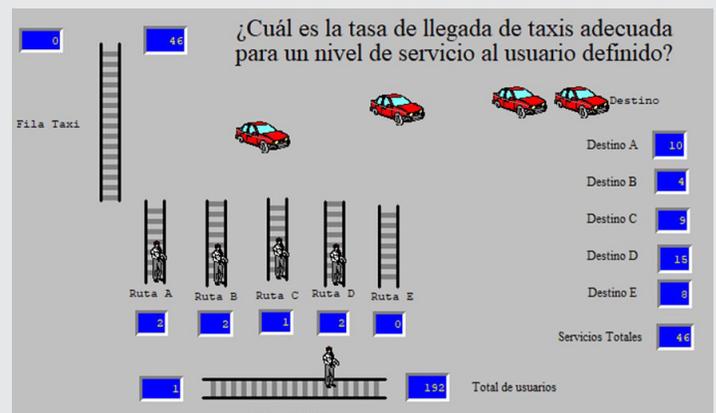


Figura 18. Corrida de dos horas a 23 taxis/hora.
Fuente: Recuperada de ProModel.

Al final de las dos horas, la fila de taxis está vacía. Se ofrecieron 46 servicios, y 7 usuarios permanecieron en sus respectivas filas, ya que no se reunieron los cuatro usuarios necesarios para solicitar el servicio antes de finalizar el periodo.

El número máximo de taxis acumulados en la fila fue de 4 unidades, como se observa en la Figura 19, teniendo mayor fluctuación entre 1 y 3 unidades formadas para prestar el servicio.

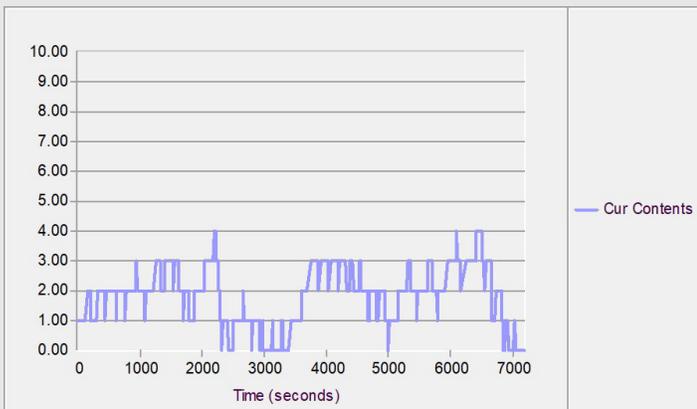


Figura 19. Taxis acumulados a 23 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Con esta asignación de taxis por hora se reduce el tiempo a 279.43 segundos que es equivalente a 4.65 minutos en promedio, estos resultados se ilustran en la Figura 20.

Taxis.mod (Normal Run - Rep. 1)									
Name	Scheduled Time (MIN)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (SEC)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization	
Fila Taxi	120.00	999999.00	46.00	279.43	1.79	4.00	0.00	0.00	
Fila Usuario	120.00	999999.00	192.00	10.21	0.27	3.00	1.00	0.00	
Ruta A	120.00	999999.00	42.00	207.84	1.21	4.00	2.00	0.00	
Ruta B	120.00	999999.00	18.00	615.64	1.54	4.00	2.00	0.00	
Ruta C	120.00	999999.00	37.00	327.78	1.68	5.00	1.00	0.00	
Ruta D	120.00	999999.00	62.00	188.18	1.62	5.00	2.00	0.00	
Ruta E	120.00	999999.00	32.00	298.34	1.33	4.00	0.00	0.00	
Destino	120.00	999999.00	46.00	3398.83	21.71	46.00	46.00	0.00	
Selección	120.00	1.00	191.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	

Figura 20. Reporte de Locaciones a 23 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Evaluando una tasa de 20 taxis/hora

En este apartado, se evalúa una tasa de llegada de 20 taxis colectivos por hora, lo que resulta en un escenario diferente a los dos anteriores, como se muestra en la Figura 21. Se resaltaron con colores fuertes los usuarios que lograron formar un grupo para que se les asignara un taxi a su destino. Al final de las dos horas, se observa que aún hay grupos pendientes por abordar, debido a que la tasa de llegada no es suficiente para atender la demanda. Se destaca un grupo formado en la ruta A (color verde) y dos grupos en las rutas C (color naranja) y D (color púrpura), esperando taxis, como se puede observar en la Figura 21.

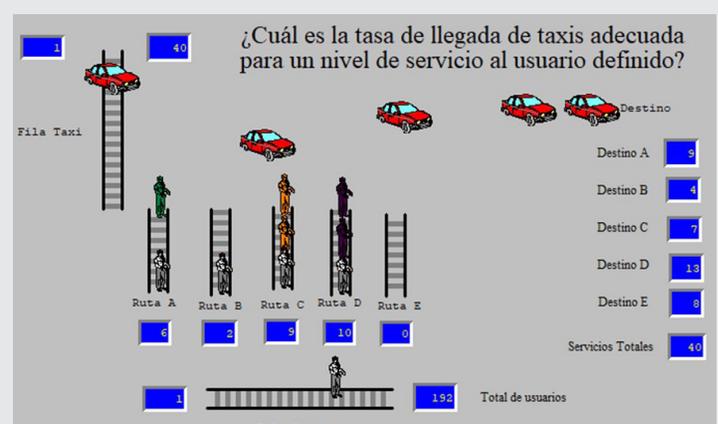


Figura 21. Corrida de dos horas a 20 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Con esta tasa, al finalizar la corrida de dos horas solo se ofrecieron 40 servicios, y hay un número excesivo de usuarios esperando taxis. Este escenario parece conveniente para el prestador del servicio, ya que los taxis son asignados casi de inmediato al entrar en la fila. Sin embargo, el nivel de servicio percibido por los usuarios es deficiente, esto se evidencia en la Figura 22, donde la fluctuación de taxis esperando a los grupos es entre 0 y 2, considerablemente más baja y por los resultados expuestos, no es suficiente para atender la demanda de usuarios.

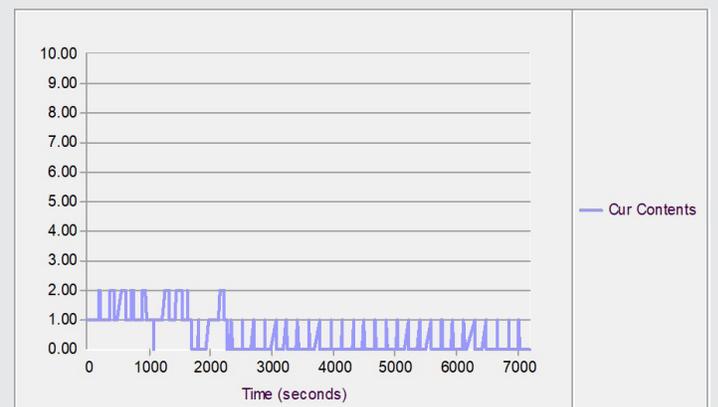


Figura 22. Taxis acumulados a 20 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Además, la cantidad de taxis disponibles y el número de usuarios no están equilibrados, lo que provoca varios problemas. Por un lado, los usuarios experimentan largos tiempos de espera, lo que genera insatisfacción y podría llevarlos a buscar alternativas de transporte. Por otro lado, la eficiencia operativa del servicio de taxis se ve afectada negativamente, ya que la falta de una oferta adecuada de taxis para cubrir la demanda genera congestión y una distribución ineficaz de los recursos, los resultados de evaluación de locaciones se muestran en la Figura 23.

General Report (Normal Run - Rep. 1)									
Taxis.mod (Normal Run - Rep. 1)									
Name	Scheduled Time (MIN)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (SEC)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization	
Fila Taxi	120.00	999999.00	41.00	66.98	0.38	2.00	1.00	0.00	
Fila Usuario	120.00	999999.00	192.00	10.21	0.27	3.00	1.00	0.00	
Ruta A	120.00	999999.00	42.00	403.75	2.36	7.00	6.00	0.00	
Ruta B	120.00	999999.00	18.00	861.21	2.15	6.00	2.00	0.00	
Ruta C	120.00	999999.00	37.00	531.81	2.73	9.00	9.00	0.00	
Ruta D	120.00	999999.00	62.00	474.35	4.08	14.00	10.00	0.00	
Ruta E	120.00	999999.00	32.00	556.78	2.47	6.00	0.00	0.00	
Destino	120.00	999999.00	40.00	3621.35	20.12	40.00	40.00	0.00	
Selección	120.00	1.00	191.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	

Figura 23. Reporte de Locaciones a 20 taxis/hora.

Fuente: Recuperada de Promodel.

Este desequilibrio también puede llevar a que los taxis operen a menos de su capacidad óptima, incrementando los costos operativos y reduciendo la rentabilidad del servicio. En resumen, es crucial ajustar la tasa de llegada de taxis para garantizar un nivel de servicio adecuado tanto para los usuarios como para los operadores del servicio.

Al reducir los tiempos de espera para tener un servicio en poco más de un minuto, en 66.98 segundos el comportamiento del tiempo de espera recae en los usuarios.

RESULTADOS

Los resultados de este estudio proporcionan una visión detallada sobre la eficiencia del servicio de taxis colectivos y el impacto de diferentes tasas de llegada de taxis en la satisfacción del usuario y la operación del servicio. A través del análisis y la simulación, se obtuvieron varios hallazgos clave.

Análisis de la Tasa de Llegada de Taxis

Tasa de 20/hora

Con una tasa de llegada de 20 taxis por hora, se observó que la demanda superaba significativamente la oferta, resultando en tiempos de espera prolongados para los usuarios y grupos pendientes de abordar al final del periodo de servicio. Solo se ofrecieron 40 servicios, con un número excesivo de usuarios esperando taxis.

Tasa de 25/hora

A una tasa de 25 taxis por hora, se encontró que hasta ocho taxis se acumulaban en la fila, reduciendo la eficiencia del servicio desde la perspectiva del prestador. Sin embargo, los usuarios disfrutaban de una disponibilidad constante de taxis.

Optimización del servicio

El ajuste a una disponibilidad de 23 taxis por hora mostró un equilibrio ajustado. Durante las dos horas de servicio, se atendieron 46 de los 192 usuarios que solicitaron el servicio, dejando pendientes a 7 usuarios y acumulando 5 taxis en la fila al finalizar el periodo. Aunque se mejoró la eficiencia operativa, la demanda se cubre parcialmente.

La Figura 24 compara visualmente las tres tasas, mostrando una relación inversa entre tiempo de espera y ocupación vehicular. La tasa de 23/hora se posiciona en el punto de inflexión de la curva, donde incrementar taxis reduce marginalmente las esperas, pero aumenta significativamente la inactividad de la flota.

Relación entre tasa de llegada, tiempo de espera y ocupación vehicular

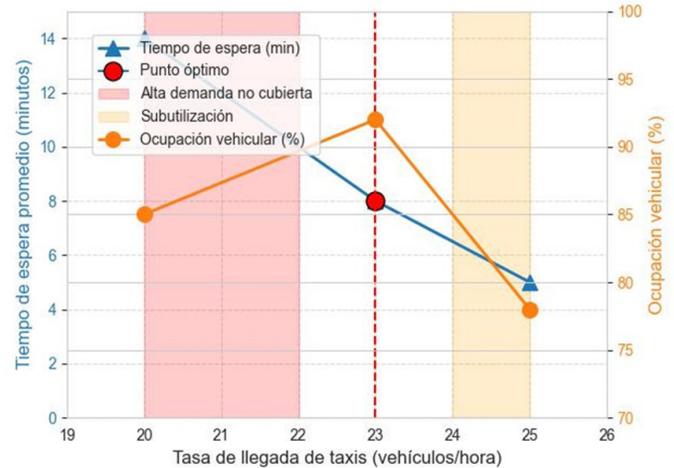


Figura 24. Punto óptimo de la tasa de llegada, tiempo de espera y ocupación vehicular.

Fuente: Elaborada en Phython.

Distribución de grupos de usuarios

La simulación mostró que la agrupación de usuarios con destinos comunes y la asignación de taxis basada en estos grupos es esencial para mejorar la eficiencia. Se destacaron diferentes grupos de usuarios en rutas específicas, evidenciando la necesidad de ajustar la oferta de taxis a la demanda específica de cada ruta, es decir, considerar aquel taxi que pueda ofrecer el servicio al destino con el grupo completo.

El análisis de sensibilidad mostrado en Tabla 2 reveló que una variación de ± 1 taxi / hora (22-24/hora) altera la eficiencia hasta en un 12%: a 22/hora, los usuarios pendientes aumentan a 15, mientras que a 24/hora, los taxis inactivos suben a 7. Esto muestra la robustez del modelo en torno a 23/hora como valor óptimo.

Tabla 2. Análisis de sensibilidad.

Tasa de Llegada (taxis/hora)	Tiempo de Espera Promedio (min)	Usuarios Atendidos	Usuarios Pendientes	Taxis Inactivos	Ocupación Vehicular (%)	Eficiencia del Sistema (%)
20	14	40	152	0	85	58
22	10	42	15	3	88	75
23	8	46	7	5	92	89
24	7	48	4	7	83	81
25	5	50	2	8	78	72

Fuente: Elaboración propia

Ajuste a distribuciones de Probabilidad

El análisis de verosimilitud de los datos capturados utilizando Stat:Fit Versión 2.0 reveló que los datos recolectados se ajustaban a una distribución de probabilidad Exponencial con media de 40 segundos. Este ajuste permitió una mejor comprensión del comportamiento de los usuarios y una aplicación más precisa del modelo de simulación.

Equilibrio entre taxis y usuarios

Se identificó un desequilibrio entre la cantidad de taxis disponibles y el número de usuarios, lo que afecta negativamente tanto la satisfacción del usuario como la eficiencia operativa. Ajustar la tasa de llegada de taxis es crucial para mejorar el nivel de servicio y la rentabilidad del servicio de taxis colectivos.

Se observó que la mejor tasa de llegada de las evaluadas es la de 23 taxis por hora, con una llegada uniforme.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que un enfoque equilibrado y basado en datos es esencial para optimizar el servicio de taxis colectivos. Ajustar la tasa de llegada de taxis, comprender la demanda de los usuarios y aplicar modelos de simulación adecuados son pasos fundamentales para mejorar la eficiencia operativa y la satisfacción del usuario.

Al abordar estos desafíos, los operadores de taxis colectivos pueden ofrecer un servicio más efectivo y satisfactorio, beneficiando tanto a los usuarios como a los prestadores del servicio.

La satisfacción del usuario se ve directamente afectada por el tiempo de espera y la disponibilidad de taxis. Los resultados indican que una adecuada tasa de llegada mejora la experiencia del usuario al reducir el tiempo de espera, lo que contribuye a una mayor satisfacción general. Sin embargo, la percepción de servicio no solo depende de la disponibilidad inmediata de taxis, sino también de la capacidad del sistema para agrupar a los usuarios de manera eficiente y ofrecer un servicio acorde a la demanda.

Los resultados indican que una tasa de llegada adecuada de taxis es fundamental para equilibrar la oferta y la demanda, optimizar la utilización de los vehículos y mejorar la satisfacción del usuario. El estudio destaca la importancia de ajustar dinámicamente la disponibilidad de taxis en función de la demanda observada y de utilizar modelos de simulación y análisis de datos para tomar decisiones informadas.

La optimización de los recursos disponibles, como los taxis y los usuarios, es esencial para mejorar la eficiencia operativa. El estudio mostró que la agrupación de usuarios con destinos comunes y la correcta asignación de taxis son estrategias efectivas para maximizar la uti-

lización de los vehículos y reducir el tiempo de espera. Ajustar la tasa de llegada y gestionar eficientemente la asignación de taxis permite una mejor utilización de los recursos y una reducción de los costos operativos.

La satisfacción del usuario no solo depende de la disponibilidad inmediata de taxis, sino también de la rapidez con la que se pueden formar los grupos necesarios para que los taxis inicien su recorrido, y esto se debe a la característica colectiva del taxi. Finalmente, el estudio también subrayó la relevancia de agrupar a los usuarios con destinos similares, lo cual contribuye en la eficiencia del sistema de transporte compartido.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México /ITS de Poza Rica por su invaluable apoyo, disposición y colaboración en este proyecto. Su contribución fue fundamental, proporcionando horas sustantivas, recurso tecnológico y fomentando un ambiente de trabajo colaborativo que hizo posible la realización de este estudio. En especial al Departamento de Gestión Empresarial, Departamento de Ingeniería Industrial y al Departamento de Posgrado por su apoyo continuo. Sus instalaciones y recursos fueron cruciales para el desarrollo y la finalización exitosa de este trabajo.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Tecnológico de Teziutlán por su valiosa ayuda sus aportaciones con perspectiva crítica y constructiva que fue esencial para mejorar la calidad y la precisión para la publicación de estos resultados.

Por otra parte, agradecemos las facilidades del Tecnológico de Misantla por la oportunidad de abrir un espacio para publicar en su Revista de investigación Ingeniantes.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Arrestegui, J. V. (2020). *Calidad de servicio y satisfacción del cliente en una empresa de transporte terrestre interprovincial de pasajeros del distrito de La Victoria, 2020 (Tesis de grado, Universidad de San Martín de Porres), Perú.*

[2] Arias, L. M. P., Montoya, L. A., & Henao, S. A. F. (2010). *Análisis de líneas de espera a través de teoría de colas y simulación. Scientia et Technica, 3(46), 56-61.*

[3] Solar Santos, D. M. (2013). *Análisis y dimensionado del servicio de taxi en una ciudad (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).*

[4] Vela, E., & Porrás, H. J. (2023). *Evaluación de la problemática del servicio de las líneas alimentadoras del Metropolitano en el sistema de transporte urbano de Lima y Callao y propues-*

ta de mejora basada en sistemas inteligentes de transporte. Universidad ESAN, 108-110.

[5] Benavides Águila, R. A. (2015). Rediseño y optimización del proceso de asignación de carreras de una empresa de Radio Taxis.

[6] Zurita P., J. E. (2024). Análisis de la calidad de servicio y su incidencia en la satisfacción del usuario del servicio de transporte público de buses urbanos de la ciudad de Tulcán. UPEC.

[7] González M. (2007). Ideas y buenas prácticas para la movilidad sostenible, Ecologistas en Acción, Madrid, España.

[8] CEPAL (2022). Herramientas para el modelamiento y la simulación de tendencias futuras en el área de la movilidad urbana. CEPAL, ONU.

[9] Bentley Systems (2025). Modelado de la demanda de viajes y simulación de la movilidad. USA.

[10] PUEC-UNAM (2022). Programa de simulación de tránsito SUMO. México.

[11] ITENE (2025). EMOBCONNECT: Tecnologías para la movilidad sostenible. Valencia, España.

[12] Drivin (2025). Optimización de rutas de transporte: ¿Cómo se logra?. Drivin Co.

[13] Akaike, H. (1998). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. Springer.

