UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Desarrollar una herramienta para estimar la cantidad adecuada en la venta de espacios de estacionamiento y maximizar las ganancias

Trabajo de graduación presentado por Sebastián Aristondo Pérez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería En Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

Desarrollar una herramienta para estimar la cantidad adecuada en la venta de espacios de estacionamiento y maximizar las ganancias

Trabajo de graduación presentado por Sebastián Aristondo Pérez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería En Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2024

Vo.Bo.:

(f) ______________________________

MSc, MBA, Ing. Luis Alberto Suriano Saravia

Tribunal Examinador:

(f) ______________________________

MSc, MBA, Ing. Luis Alberto Suriano Saravia

(f) ______________________________

Ing. Douglas Leonel Barrios González

(f) ______________________________

MSc, Ing. Paulo Vladimir Mejía Castillo

Fecha de aprobación: Guatemala, 2 de diciembre de 2024.

Índice

Lista de figuras

Lista de cuadros

Resumen

Esta investigación se centra en determinar la cantidad óptima de asignaciones de parqueo a vender a los estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala en su sede central, utilizando simulaciones computacionales. Se desarrolló un modelo de simulación basado en agentes, el cual permite explorar fenómenos sociales de manera efectiva.

Para la simulación se definieron cuatro horarios: matutino (6:30 AM a 1:00 PM), vespertino (10:00 AM a 4:30 PM), nocturno (3:30 PM a 10:00 PM) y horario completo (6:30 AM a 10:00 PM). Estos horarios se eligieron para garantizar una distribución equilibrada y partir de un caso ideal y controlado. A través de la simulación, se evaluaron 208 distribuciones horarias diferentes para poblaciones estudiantiles variables.

El modelo implementado considera no solo la ocupación de los espacios de parqueo, sino también el beneficio económico para la universidad, maximizando la cantidad de plazas vendidas mientras se mantiene un equilibrio entre la demanda y la oferta. A lo largo del estudio, se realizaron simulaciones para diferentes cantidades de espacios de parqueo, desde 25 hasta 150, observando que la capacidad máxima se relaciona directamente con la cantidad de plazas disponibles.

Finalmente, se aplicaron regresiones polinómicas para modelar los resultados, obteniendo una función que permite estimar el número óptimo de asignaciones sin necesidad de realizar simulaciones para cada escenario. Este enfoque permite a la universidad ajustar su política de venta de asignaciones de parqueo de manera eficiente y adaptable a cambios en la demanda.

Los resultados de esta investigación proporcionan una herramienta valiosa para la gestión de estacionamientos en la Universidad del Valle de Guatemala, optimizando el uso de los recursos y aumentando la satisfacción de los estudiantes y de la institución.

Abstract

This research focuses on determining the optimal number of parking allocations to be sold to students at Universidad del Valle de Guatemala's main campus through computational simulations. A simulation model based on agents was developed to effectively explore social dynamics related to parking demand. Four time slots were defined for the simulation: morning (6:30 AM to 1:00 PM), afternoon (10:00 AM to 4:30 PM), evening (3:30 PM to 10:00 PM), and full-day (6:30 AM to 10:00 PM), ensuring a balanced distribution of usage.

The simulation evaluated various population sizes, progressively increasing the number of users to identify the maximum capacity under which no student was rejected and the university's revenue was maximized without violating municipal regulations. After conducting simulations with parking capacities of 25, 50, 75, 90, 100, and 150 spaces, polynomial regression models were applied to identify patterns and predict optimal allocation for larger parking lots.

The results show that a cubic polynomial regression accurately predicts the optimal number of allocations for different parking capacities, achieving a high determination coefficient ($R^2 = 0.99993$). These findings suggest that simulations for each individual parking lot may not be necessary, as the regression model provides reliable estimations. This model can be adapted to different schedules, making it a flexible tool for optimizing parking allocations while maximizing the university's revenue.

CAPÍTULO 1

Introducción

En el año 2023 en Guatemala se vendieron 54 mil 711 vehículos, lo que representó un aumento del 18 % en comparación al 2022, alrededor de 9 mil 981 vehículos más, según informó Jean Pierre Devaux, director de la Asociación de Importadores y Distribuidores de Vehículos Automotores (Aidva) [1].A medida que aumenta el número de vehículos, la demanda de servicios de estacionamiento también se incrementa. Sin embargo, la capacidad de estacionamiento no puede expandirse al mismo ritmo que el crecimiento del parque automotor, lo que resulta en un déficit en el servicio disponible [2]. Este déficit se intenta compensar mediante el aumento de las tarifas de entrada en los estacionamientos o mediante intentos de acomodar más vehículos en el mismo espacio disponible [3].

En la gestión de un estacionamiento, uno de los desafíos principales radica en determinar cuántas asignaciones de estacionamiento vender en un período de tiempo dado [4]. Esto se debe a la naturaleza variable del comportamiento de los usuarios, quienes pueden utilizar el estacionamiento por períodos de tiempo variables a lo largo de la semana. Además, las decisiones de permanecer o abandonar el estacionamiento pueden estar influenciadas por una variedad de factores personales y externos, como compromisos laborales, citas médicas o simplemente cambios imprevistos en los planes del día. Esta complejidad en el comportamiento del usuario hace que predecir y comprender este fenómeno del uso del estacionamiento sea un desafío considerable para los administradores del estacionamiento, que deben equilibrar la oferta de asignaciones disponibles con la demanda fluctuante de los usuarios de manera eficiente y rentable.

Este proyecto tiene como objetivo abstraer estos problemas mediante el desarrollo de una herramienta de simulación computacional. Esta herramienta permitirá modelar el comportamiento de los usuarios en el estacionamiento, teniendo en cuenta algunas de las variables involucradas en las decisiones de los estudiantes. Al utilizar una simulación, se podrá analizar la ocupación del estacionamiento en diferentes horas del día y de la semana. De esta manera, se busca proporcionar a los administradores del estacionamiento de la UVG una herramienta para tomar decisiones sobre la cantidad adecuada de asignaciones a vender en un semestre, tomando en cuenta las necesidades de los alumnos, las regulaciones municipales y las ganancias de la Universidad.

CAPÍTULO 2

Justificación

Tras la pandemia de COVID-19, la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) experimentó un crecimiento significativo en la cantidad de estudiantes matriculados, impulsado por su prestigiosa calidad educativa y las modernas instalaciones del Centro de Innovación y Tecnología (CIT). No obstante, este aumento en la población estudiantil ha traído consigo un desafío adicional: la creciente demanda de espacios de estacionamiento dentro del campus. Como consecuencia, los estacionamientos han alcanzado su capacidad máxima, lo que ha provocado que muchos estudiantes enfrenten dificultades para encontrar una plaza disponible.

La falta de disponibilidad de parqueos puede resultar en que los estudiantes dediquen una cantidad considerable de tiempo buscando un espacio, lo cual tiene un impacto negativo en su puntualidad y rendimiento académico al retrasarse en el inicio de las clases a las que deben asistir.

En este contexto, el desarrollo de una herramienta de simulación computacional se presenta como una solución innovadora y eficiente frente a otros enfoques. Entre las ventajas destacadas de esta herramienta se encuentran su capacidad para explorar una amplia gama de escenarios modificando únicamente las variables y parámetros del modelo. Además, mientras que realizar experimentos reales puede resultar costoso y riesgoso, una simulación ofrece una alternativa más económica y segura para probar hipótesis y estrategias. Asimismo, su alta escalabilidad permite modelar las interacciones en los parqueos, incluso si estos aumentan en número con el tiempo, asegurando su aplicabilidad en escenarios futuros.

CAPÍTULO 3

Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar mediante una simulación computacional, la cantidad adecuada de asignaciones de parqueo a vender a los estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala en su sede central.

3.2. Objetivos Específicos

- Definir las reglas que rigen al estacionamiento y los horarios de uso por parte de los agentes.
- Desarrollar un modelo de simulación basado en agentes para la interacción en el estacionamiento.
- Simular el uso de los parqueos de modo que a ningún agente se le rechace su asignación, la universidad obtenga el mayor beneficio y cumplir con las regulaciones municipales de parqueo.

CAPÍTULO 4

Marco teórico

4.1. Simulación computacional

Una simulación computacional es una técnica en la que se utiliza algoritmos y modelos matemáticos implementados en computadoras para imitar el comportamiento de sistemas reales o teóricos a lo largo del tiempo. Este método permite estudiar y analizar comportamientos de sistemas complejos sin la necesidad de realizar experimentos físicos.[5]

4.2. Variable aleatoria

Una variable aleatoria es una función que asigna un valor numérico a cada resultado posible de un experimento aleatorio. En otras palabras, es una regla que asocia a cada evento en el espacio muestral de un experimento aleatorio un número real. Por ejemplo, al lanzar una moneda, podemos definir una variable aleatoria que tome el valor 1 si sale cara y 0 si sale cruz [6].Las variables aleatorias pueden clasificarse en dos tipos principales.

4.2.1. Variables aleatorias discretas:

Estas variables pueden tomar un número finito o una cantidad numerable de valores distintos. Por ejemplo, el número de caras obtenidas al lanzar una moneda tres veces es una variable aleatoria discreta, ya que solo puede tomar los valores 0, 1, 2 o 3.

La función que describe la distribución de probabilidad de una variable aleatoria discreta se conoce como *función de probabilidad*. Esta función asigna una probabilidad a cada valor posible que puede tomar la variable aleatoria, asegurando que la suma de todas las probabilidades sea igual a 1.

4.2.2. Variables aleatorias continuas:

Estas variables pueden tomar cualquier valor en un intervalo continuo. Por ejemplo, la altura de una persona, medida con precisión infinita, es una variable aleatoria continua, ya que puede tomar cualquier valor dentro de un rango específico.

La función que describe la distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua se conoce como *función de densidad de probabilidad.* En este caso, la función no asigna una probabilidad a un valor específico, sino que describe la densidad de probabilidad en un intervalo. La probabilidad de que la variable tome un valor dentro de un intervalo se obtiene calculando el área bajo la curva de la función de densidad sobre dicho intervalo.

4.3. Distribución de probabilidad

Una distribución de probabilidad es una función matemática que proporciona los posibles valores que una variable aleatoria puede asumir y la probabilidad de que la variable tome esos valores. En términos más formales, si X es una variable aleatoria, una distribución de probabilidad asigna una probabilidad P a cada posible valor que X puede tomar, tal que P(X=x).

Las distribuciones de probabilidad son fundamentales en la modelización y simulación de sistemas, ya que permiten representar y analizar la incertidumbre inherente en procesos aleatorios. Al utilizar distribuciones de probabilidad, se pueden generar escenarios y predicciones sobre eventos futuros, realizar experimentos virtuales y entender mejor el comportamiento de sistemas complejos. Por ejemplo, la distribución binomial se utiliza para modelar el número de éxitos en una serie de ensayos independientes y con la misma probabilidad de éxito. Esto es útil en simulaciones para evaluar situaciones donde solo hay dos resultados posibles, como éxito o fracaso. Por ejemplo, en un estudio de marketing, la distribución binomial puede modelar la probabilidad de que un cierto número de personas respondan positivamente a una campaña publicitaria, permitiendo a los analistas estimar y planificar estrategias efectivas basadas en la probabilidad de diversos escenarios. Este tipo de análisis ayuda a tomar decisiones informadas bajo incertidumbre y a optimizar resultados en diversas aplicaciones. [7], [8] Las probabilidades más utilizadas en el campo de la simulación son las siguientes.

4.3.1. Distribuciones Discretas

Una distribución discreta es una distribución de probabilidad que describe el comportamiento de variables aleatorias que pueden tomar un conjunto finito o contable de valores. Estas distribuciones asignan probabilidades específicas a cada uno de estos valores posibles.

Definición formal: Sea X una variable aleatoria discreta. Una función de probabilidad $P(X = x_i)$ asigna una probabilidad a cada valor x_i en el conjunto de posibles valores $x_1, x_2, \ldots x_n$. La suma de todas estas probabilidades es igual a 1

$$\sum_i P(X = x_i) = 1$$

6.3.1.1. Distribución binomial

La distribución binomial es una distribución discreta crucial en muchas aplicaciones bioestadísticas. Esta distribución fue obtenida por Jakob Bernoulli (1654-1705) y publicada en su obra póstuma *Ars Conjectandi* en 1713. Surge de manera natural al realizar repeticiones independientes de un experimento con respuesta binaria, clasificable generalmente como "éxito" o "fracaso". Este tipo de experimento es conocido como experimento de Bernoulli. Ejemplos de respuesta binaria incluyen hábitos de fumar (sí/no), si un paciente hospitalizado desarrolla una infección o no, o si un artículo de un lote es defectuoso o no.[7]

La variable discreta que cuenta el número de éxitos en n pruebas independientes de un experimento, cada una con una probabilidad constante de éxito p, sigue una distribución binomial de parámetros n y p, denotada como $\mathrm{Bi}(n, p)$. Este modelo es aplicable tanto a poblaciones finitas de las que se seleccionan elementos al azar con reemplazo, como a poblaciones conceptualmente infinitas, como en el caso de las piezas producidas por una máquina, siempre que el proceso de producción sea estable (la proporción de piezas defectuosas se mantenga constante a largo plazo) y sin memoria (el resultado de cada pieza no dependa de las anteriores).[7]

6.3.1.2. Distribución Poisson

La distribución de Poisson lleva el nombre del matemático francés Simeón Denis Poisson (1781-1840), aunque fue introducida en 1718 por Abraham De Moivre (1667-1754) como un caso límite de la distribución binomial que surge cuando se observa un evento raro después de un gran número de repeticiones. En general, la distribución de Poisson con parámetro λ se puede utilizar como una aproximación de la binomial, $\mathrm{Bin}(n, p)$, si el número de pruebas n es grande y la probabilidad de éxito p es pequeña, con $\lambda = np$. Podemos considerar que la aproximación Poisson-binomial es "buena" si $n \geq 20$ y $p \leq 0,05$, y "muy buena" si $n \geq 100$ y $p \leq 0,01$.[7]

La distribución de Poisson también describe situaciones en las que un evento raro ocurre aleatoriamente en el espacio o en el tiempo. La variable asociada es el número de ocurrencias del evento en un intervalo o espacio continuo, por lo tanto, es una variable aleatoria discreta que toma valores enteros no negativos (0, 1, 2, ...). Ejemplos de variables que siguen una distribución de Poisson incluyen el número de pacientes que llegan a un consultorio en un periodo dado, el número de llamadas que recibe un servicio de atención a urgencias durante una hora, el número de células anormales en una superficie histológica, o el número de glóbulos blancos en un milímetro cúbico de sangre. En general, es una distribución ampliamente utilizada en diversas áreas de la investigación médica y, en particular, en epidemiología.[7]

4.3.2. Distribuciones Continuas

Una distribución continua describe el comportamiento de variables aleatorias que pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo o conjunto no contable de valores. A diferencia de las distribuciones discretas, las distribuciones continuas no asignan probabilidades a valores específicos, sino que describen la probabilidad de que una variable aleatoria caiga dentro de un cierto rango a través de una función de densidad de probabilidad (PDF).[7], [8]

Definición formal: Sea X una variable aleatoria continua. La función de densidad de probabilidad $f(x)$ está definida de tal manera que la probabilidad de que X esté entre dos valores a y b es igual a la integral de $f(x)$ entre esos límites [7], [8]:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)\,dx$$

La función de densidad de probabilidad debe cumplir la condición:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\,dx = 1$$

6.3.2.1. Distribución Gamma

La distribución gamma se caracteriza de la siguiente manera: si se está interesado en la ocurrencia de un evento generado por un proceso de Poisson con media λ, la variable que mide el tiempo transcurrido hasta obtener n ocurrencias del evento sigue una distribución gamma con parámetros $a = n\lambda$ (escala) y $p = n$ (forma). Esta distribución se denota como $\text{Gamma}(a, p)$. [7], [8]

Por ejemplo, la distribución gamma se utiliza en el estudio de la duración de elementos físicos, como el tiempo de vida de dispositivos o materiales. Cuando p es un número entero positivo, se obtiene un caso particular de la distribución gamma conocido como distribución de Erlang. Otros casos particulares incluyen la distribución exponencial ($\text{Gamma}(\lambda, 1)$) y la distribución ji-cuadrado ($\text{Gamma}(1/2, n/2)$).

Dependiendo del valor del parámetro de forma, p, la función de densidad de la distribución gamma puede presentar diferentes perfiles. Si $p \leq 1$, la función de densidad es decreciente; en cambio, si $p > 1$, la función de densidad primero crece hasta alcanzar un máximo en $x = (p - 1)/a$ y luego decrece.

6.3.2.2. Distribución exponencial

La distribución exponencial es un caso particular de la distribución gamma y es el equivalente continuo de la distribución geométrica discreta. Esta distribución describe procesos en los que se desea conocer el tiempo hasta que ocurre un determinado evento; se utiliza especialmente para modelar tiempos de supervivencia. Un ejemplo de aplicación es medir el tiempo que tarda una partícula radiactiva en desintegrarse, lo cual es fundamental para la datación de fósiles o cualquier materia orgánica mediante la técnica del carbono 14.

Una característica importante de la distribución exponencial es la propiedad conocida como "falta de memoria". Esta propiedad indica que la probabilidad de que un individuo de edad t sobreviva x años más, hasta la edad $x+t$, es la misma que la probabilidad de un recién nacido de sobrevivir hasta la edad x. En términos generales, el tiempo transcurrido desde cualquier instante dado t_0 hasta que ocurre el evento no depende de lo que haya sucedido antes del instante t_0.

Una variable aleatoria que tome valores positivos y que verifique la propiedad de "falta de memoria" sigue una distribución exponencial. Esta distribución puede caracterizarse como la distribución del tiempo entre sucesos consecutivos generados por un proceso de Poisson. Por ejemplo, el tiempo entre dos heridas graves sufridas por una persona. El parámetro λ, que representa la tasa de ocurrencia del evento por unidad de tiempo, es el parámetro de la distribución exponencial. La media de la distribución es $\frac{1}{\lambda}$, que es el valor medio de la distribución.

6.3.2.3. Distribución uniforme

La distribución uniforme es útil para describir una variable aleatoria con probabilidad constante sobre el intervalo (a, b) en el que está definida, y se denota por $U(a, b)$. También es conocida como *distribución rectangular* debido al aspecto de su función de densidad de probabilidad.[7], [8]

Una peculiaridad importante de esta distribución es que la probabilidad de un suceso depende exclusivamente de la amplitud del intervalo considerado y no de su posición en el campo de variación de la variable. **Función de densidad de probabilidad (pdf):**

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{sí } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Propiedad importante:

Cualquiera que sea la distribución F de cierta variable X, la variable transformada $Y = F(X)$ sigue una distribución uniforme en el intervalo $(0, 1)$. Esta propiedad es fundamental para la generación de números aleatorios de cualquier distribución en técnicas de simulación, y recibe el nombre de *método de inversión.*

4.4. Teoría Organizacional

El campo de estudio de la teoría organizacional se enfoca en la investigación de los principios y conceptos que regulan el comportamiento de las organizaciones. Para entender el desarrollo y manejo de las organizaciones, este campo multidisciplinario se fundamenta sobre diversas ciencias sociales, tales como la sociología, la psicología, la economía y la gestión. El uso de estas ciencias sobre una organización puede ayudar a entender la cultura y las dinámicas internas que influyen en el funcionamiento de una entidad organizativa. [9]

Los elementos fundamentales estudiados en la teoría organizacional incluyen la estructura organizativa, que define cómo se dividen, agrupan y coordinan las tareas o recursos; la cultura organizacional, que abarca los valores y normas compartidas dentro de la organización; las herramientas y tecnologías utilizadas en los procesos administrativos; los métodos de comunicación, esencial para un funcionamiento eficaz; la toma de decisiones, apegadas a la cadena de mando estipulado; y las metas planteadas por la organización a corto, mediano y largo plazo. Todo esto es importante al momento de estudiar una organización ya que todas las reglas y conductas establecidas tienen un impacto en sus miembros, así como el comportamiento de sus miembros un impacto en la organización.[9]

Dentro de la teoría organizacional, existen varias perspectivas clave que ofrecen una comprensión integral de cómo las organizaciones pueden ser diseñadas y gestionadas para alcanzar sus objetivos de manera eficaz y eficiente. Estas perspectivas incluyen:

4.4.1. Teoría Clásica

La teoría clásica de la administración es una corriente de conocimiento que surgió en respuesta al acelerado crecimiento empresarial luego de la Segunda Revolución Industrial. La teoría establece que hay 14 principios los cuales explican cómo el poder, el trabajo y la responsabilidad deben ser distribuidos correctamente para un desempeño óptimo. Si no se hace una distribución correcta, la estabilidad del personal comienza a decaer, y el trato equitativo se transforma en una competencia por los recursos o beneficios que brinda el patrocinador. [10]

4.4.2. Teoría de Sistemas

La teoría de sistemas busca identificar los diversos elementos y tendencias dentro de un sistema, destacando sus interrelaciones e interdependencias. Al considerar estos elementos como partes de un todo integrado, se puede lograr un mayor entendimiento de la organización en comparación con el análisis de cada dependencia y relación de forma aislada. Esto significa que un sistema puede descomponerse en sus partes más pequeñas para estudiar cómo la modificación de una de ellas altera el comportamiento del resto de los componentes. [11]

4.4.3. Teoría Contingencial

La teoría de la contingencia sostiene que no existen absolutos en la administración. Una técnica que funciona bien en una organización puede no producir los mismos resultados en otra. Según esta teoría, todo es relativo y depende de la relación entre las técnicas administrativas utilizadas y las situaciones internas y externas de la organización. Dado que no existe una única forma de administrar ni una solución única para todos los problemas. Los cambios en las condiciones ambientales pueden afectar los objetivos de la empresa de manera tanto positiva como negativa. Es decir que incluso una solución puede que dé resultados únicamente en un lapso ya que las condiciones lo permitían. Por ello, es crucial tener planes de contingencia preparados para cuando el entorno de la organización cambie, de modo que se puedan proteger y alcanzar los objetivos propuestos.[12]

4.4.4. Teoría Organizacional Computacional

La Teoría Organizacional Computacional surge como un campo interdisciplinario que combina los principios de la teoría organizacional con técnicas y modelos de la ciencia de la computación. Esta integración multidisciplinaria permite entender el comportamiento y la estructura de las organizaciones, facilitando la toma de acciones para mejorarlas. Las organizaciones y sus integrantes pueden ser representados computacionalmente, permitiendo así la simulación y el análisis de diversos escenarios organizacionales.[13]

El enfoque computacional permite modelar las interacciones entre los diferentes actores dentro de una organización, así como los procesos y flujos de información que afectan su desempeño. Mediante el uso de herramientas como algoritmos de optimización, modelos de simulación y técnicas de inteligencia artificial, es posible predecir y analizar el impacto de diferentes decisiones y estrategias en la eficiencia y efectividad organizacional.[13]

Además, la Teoría Organizacional Computacional puede ayudar a identificar patrones emergentes y dinámicas complejas dentro de las organizaciones, lo que puede llevar a una mejor comprensión de fenómenos como el comportamiento organizacional, la dinámica de grupos y la toma de decisiones. Este enfoque también facilita el diseño de sistemas de apoyo a la toma de decisiones y la implementación de estrategias organizacionales basadas en datos y modelos computacionales. [13]

4.5. Agentes

Un agente es una entidad capaz de percibir su entorno y actuar sobre él para alcanzar objetivos específicos. Los agentes pueden ser tanto software (como programas de computadora) como hardware (como robots). Su principal característica es la autonomía, que les permite operar sin intervención humana directa. Los agentes son fundamentales en diversas áreas, como la inteligencia artificial, la robótica, la simulación de sistemas complejos y más.

4.5.1. Simulación Agentes

La simulación de agentes es una técnica que utiliza modelos computacionales para representar agentes y sus interacciones dentro de un entorno simulado. Cada agente tiene reglas que dictan su comportamiento, y estos comportamientos individuales pueden llevar a la aparición de patrones complejos en el sistema global. [14], [15]

La simulación de agentes es una herramienta poderosa para estudiar sistemas complejos donde las interacciones entre componentes son clave. Permite realizar experimentaciones seguras y económicas; simular escenarios peligrosos, costosos o impracticables en la realidad, como desastres naturales o crisis financieras.[14], [15]

Un ejemplo notable es el uso de simulaciones de agentes en el análisis de redes sociales y la propagación de información. Estos modelos han ayudado a entender cómo se difunden las noticias falsas y a diseñar estrategias para mitigar su impacto.

Durante la pandemia de COVID-19, se utilizaron modelos de agentes para simular la propagación del virus en diferentes comunidades y países. Cada agente representaba a un individuo con atributos como edad, estado de salud y comportamiento social (por ejemplo, el uso de mascarillas o la práctica del distanciamiento social). Además, los agentes podían interactuar entre sí y con su entorno (lugares públicos, hogares, hospitales), lo que afectaba las probabilidades de transmisión del virus. [16]

4.5.2. Agentes Autónomos

En el contexto de simulación y modelación, los agentes autónomos se definen como entidades individuales capaces de tomar decisiones y realizar acciones de manera independiente, basándose en reglas y comportamientos predefinidos o aprendidos. Estos agentes se utilizan para modelar y simular sistemas complejos, donde múltiples componentes interactúan entre sí, permitiendo así el estudio detallado de dichas interacciones y sus consecuencias.[14], [15]

Las características principales de los agentes autónomos son:

6.5.2.1. Autonomía

Los agentes operan sin intervención humana directa, tomando decisiones en función de su programación o mediante algoritmos de inteligencia artificial. Esto les permite actuar de manera independiente, persiguiendo sus propios objetivos.[14], [15]

6.5.2.2. Reactividad

Los agentes tienen la capacidad de percibir su entorno y responder a los cambios que ocurren en él. Esta característica es fundamental para adaptarse a entornos dinámicos y en constante evolución.[14], [15]

6.5.2.3. Proactividad

Además de reaccionar a su entorno, los agentes pueden tomar la iniciativa para alcanzar objetivos específicos, mostrando así un comportamiento dirigido y planificado.[14], [15]

6.5.2.4. Comunicación

En muchos modelos, los agentes pueden interactuar y comunicarse entre sí. Esta comunicación es crucial para la coordinación de acciones y el intercambio de información, lo que puede influir en las decisiones individuales y colectivas.[14], [15]

6.5.2.5. Comportamiento Emergente

El comportamiento emergente se refiere a patrones, estructuras o comportamientos que surgen espontáneamente de las interacciones entre componentes de un sistema, sin que estos patrones estén programados explícitamente. Es un fenómeno común en sistemas complejos donde el comportamiento del sistema global no puede ser simplemente deducido de las acciones de los individuos.[14], [15]

CAPÍTULO 5

Metodología

5.1. Descripción de la problemática

La población estudiantil en la universidad es dinámica, variando significativamente de un semestre a otro. Esta variabilidad se refleja en los horarios, que cambian anualmente debido a la rotación de las materias y la fluctuación en la cantidad de secciones disponibles por asignatura. Estos factores hacen imposible la aplicación de una solución única y definitiva para la gestión de los espacios de estacionamiento a lo largo de los semestres, tal como lo sugiere la teoría contingencial [12]. Cada semestre presenta un nuevo desafío en cuanto a la cantidad de parqueos que deben ser vendidos, ya que las condiciones cambian constantemente.

Por lo tanto, es fundamental considerar variables como el número de estudiantes y sus horarios para determinar la estrategia de venta de parqueos más adecuada para cada año académico.

5.2. Herramientas y Software Utilizados

Python es reconocido por su versatilidad y robustez en el ámbito de la ciencia de datos y la simulación computacional. El lenguaje cuenta con un amplio ecosistema de bibliotecas especializadas, como NumPy, Pandas y Matplotlib, que son esenciales para la manipulación de grandes volúmenes de datos, la realización de cálculos complejos y la visualización de resultados de manera clara y precisa.

El uso de Python no solo asegura un desarrollo ágil debido a mi experiencia con el lenguaje, sino que también permite la escalabilidad del proyecto. La flexibilidad de Python facilita la integración de nuevas funcionalidades y la adaptación a diferentes escenarios sin la necesidad de reestructuraciones significativas, lo que lo convierte en una opción idónea para la creación de modelos de simulación con múltiples parámetros.

Finalmente, Python es un lenguaje de código abierto ampliamente utilizado tanto en la academia como en la industria, lo que garantiza la replicabilidad y accesibilidad del trabajo. Esto permite que otros investigadores puedan utilizar o mejorar los modelos desarrollados en esta tesis, contribuyendo así al avance del conocimiento en el área.

Bibliotecas Utilizadas

- **SimPy:** Para la simulación de eventos discretos.
- **Pandas:** Para la gestión de datos generados por la simulación.
- **NumPy y random:** Para la generación de distribuciones de probabilidad.
- **Matplotlib:** Para la visualización de los resultados de la simulación.
- **Os:** Para acceder a las imágenes generadas por Matplotlib.
- **Image:** Para convertir las imágenes en un gif y poder visualizar la simulación
- **sklearn:** Para el uso de regresión lineal y polinómica.

5.3. Sistema

El sistema por modelar consiste en la gestión de los espacios de parqueo dentro de un campus universitario. La meta principal es estimar la cantidad óptima de parqueos que se deben vender cada semestre bajo las siguientes restricciones: asegurar que ningún alumno se quede sin parqueo, maximizar la utilización de los espacios disponibles y mantener una cola eficiente para los alumnos que esperan estacionarse.

Componentes del Sistema:

- Estudiantes : Cada estudiante representa un agente que tiene la intención de estacionar su vehículo en el campus. Su comportamiento varía según su horario de clases y sus decisiones dentro del campus.
- Parqueos Disponibles: Estos son los espacios designados oficialmente para estacionamiento, con capacidad fija, que no puede ser ampliada durante la simulación.
- Cola de Espera: Si los parqueos están llenos, los vehículos deben esperar en una cola. Este elemento es crítico, ya que si un alumno alcanza su hora de salida mientras está en la cola este se retirará y contará como un vehículo no atendido.

5.4. Modelo

El modelo es una representación simplificada del sistema de parqueos universitario, diseñado para capturar los elementos y relaciones más relevantes para analizar el comportamiento del sistema. En este caso, el parqueo se representa mediante una matriz, lo que permite modelar la disposición de los espacios y la gestión de la ocupación en un formato estructurado y visualmente intuitivo.

El modelo captura las siguientes interacciones clave:

- **Matriz del Parqueo:** Los espacios de estacionamiento están organizados en una matriz, donde cada celda representa un espacio disponible u ocupado. La asignación de los espacios sigue el principio de *Primero en Entrar, Primero en Salir* (PEPS).
- **Clase Vehículo (Agente):** Cada agente es un alumno representado mediante una clase `Vehículo`, la cual contiene atributos y métodos que determinan su comportamiento.
- **Matriz de la Cola de Espera:** Si todos los espacios están ocupados, los alumnos se colocan en una cola de espera, también representada mediante una matriz. Aquí, los agentes esperan hasta que se libere un espacio o hasta que decidan abandonar la cola debido a que sus clases ya han finalizado.

Este enfoque basado en matrices y clases permite abstraer la complejidad del sistema, concentrándose en la interacción entre los agentes (alumnos) y el entorno (parqueos y cola de espera).

5.5. Agentes

El agente, representado por la clase `Vehículo`, es responsable de simular la entrada y salida de vehículos en un estacionamiento, teniendo en cuenta diferentes factores que influyen en su comportamiento.

5.5.1. Definición del Agente

El agente se inicializa con varios parámetros, incluyendo su identificador (`id`), tiempos de entrada y salida (`tiempo_entrada`, `tiempo_salida`), y un conjunto de tiempos libres (`tiemposLibres`). Al momento de la creación del agente, se establece su estado inicial, que incluye el tiempo de espera (`tiempo_espera`) y el tiempo dentro del estacionamiento (`tiempo_dentro`).

5.5.2. Funcionamiento del Agente

El agente realiza varias acciones a lo largo de su ciclo de vida:

- **Almuerzo**: Si el tiempo de salida del vehículo cae dentro de un intervalo definido para el almuerzo (`almuerzoinf` y `almuerzosup`), el agente tiene una probabilidad de quedarse a almorzar. Esto se determina utilizando una distribución binomial.
- **Decisión de Tiempo Libre**: El agente puede decidir salir durante un tiempo libre. Esto se gestiona a través del método `TiempoLibre`, que evalúa si el agente puede salir basado en los períodos libres disponibles. Para esta decisión se utilizó la distribución geométrica de manera que mientras más períodos libres se tenga más probable que el alumno se retire por un tiempo.
- **Acciones Diarias**: Cada día, el agente puede realizar acciones que afectan su tiempo de espera y entrada/salida. Se registra cada acción en un diccionario (`acciones`) para facilitar el seguimiento del comportamiento diario.

5.5.3. Variables Clave

A continuación, se presentan algunas de las variables más relevantes que definen el comportamiento del agente:

- `tiempo_espera`: Representa el tiempo que el agente ha estado esperando en la cola durante el día.
- `tiempo_dentro`: Indica el tiempo total que el agente ha estado dentro del estacionamiento.
- `offsetSalidaAlmuerzo`: Es un ajuste en el tiempo de salida que se aplica si el agente decide quedarse a almorzar.
- `TiemposLibres`: Una lista que almacena los períodos libres en los que el agente puede salir.
- `horario_color`: Un diccionario que define el color del horario del agente, el cual puede utilizarse para la visualización.

5.6. Simulación

5.6.1. Descripción del Modelo de Simulación

La simulación modela el comportamiento del estacionamiento universitario durante un día típico de clases, abarcando desde las 6:00 a.m. hasta las 10:00 p.m. Los intervalos de tiempo se dividen en bloques de 10 minutos, y los agentes (vehículos representando a estudiantes) interactúan con el entorno (el estacionamiento y la cola de espera) en cada intervalo. El flujo de la simulación sigue estos pasos principales:

1. **Inicialización de cada día**: Se reinician las variables como disponibilidad de parqueos y se reinician las condiciones necesarias para un nuevo ciclo de simulación.

2. **Iteración por intervalos de tiempo**: En cada intervalo de 10 minutos, se evalúan las siguientes acciones:
   - **Llegada de vehículos**: Se verifica si un vehículo llega según su horario asignado. Si hay espacio, se estaciona. Si no, el vehículo se agrega a la cola de espera.
   - **Gestión de la cola de espera**: Los vehículos en espera verifican si se ha liberado un espacio, en cuyo caso el vehículo en espera estaciona.
   - **Acciones del estudiante**: Todas las acciones programadas en el agente se evaluarán si deben ejecutarse, por ejemplo, quedarse a almorzar, salir en su tiempo libre para luego regresar en su siguiente clase, etc.
   - **Salida de vehículos**: Los vehículos salen del parqueo o de la cola según sus horarios, liberando espacio para otros vehículos.
3. **Cierre del día y registro de estadísticas**: Al finalizar cada día, se recopilan datos como el número de vehículos estacionados, el tiempo mínimo y máximo esperados en la cola, cuantos alumnos salieron a almorzar y cuantos alumnos salieron en sus periodos libres

5.6.2. Suposiciones y Simplificaciones

La simulación se lleva a cabo bajo las siguientes condiciones simplificadas:

- Cada vehículo transporta a un solo estudiante.
- Se simulan solo 30 días de los 6 meses que componen un semestre universitario.
- Los alumnos siempre llegan según su hora de llegada definida y no faltan por ninguna razón.
- Los alumnos deciden salir solo si es su hora de salida o si tienen un periodo libre entre clases y desean salir temporalmente.

5.6.3. Escenarios Simulados

La simulación permite ajustar múltiples parámetros para modelar diferentes escenarios, con el objetivo de encontrar el número óptimo de parqueos a vender y ser una herramienta escalable. Los parámetros que se pueden modificar son:

- **Capacidad del estacionamiento**: Simulación con diferentes números de espacios disponibles.
- **Horarios de llegada y salida**: Distribuciones que determinan cuándo los estudiantes llegan y se van.
- **Cantidad de días**: Cuantos días se desean simular
- **Hora de inicio de la simulación**: A partir de qué hora se inicia la simulación

- **Tiempo de parqueo**: A partir de la hora de inició cuanto tiempo el parqueo estará abierto

Estos escenarios permiten que el usuario introduzca los valores representativos de su población objetivo y realice simulaciones personalizadas.

La herramienta ofrece dos modos de operación:

1. **Especificación exacta de estudiantes por horario**: El usuario ingresa la cantidad precisa de personas en cada horario, y al finalizar la simulación, se evalúa si la distribución permite atender a todos los estudiantes sin rechazos.
2. **Simulación con diferentes poblaciones de vehículos**: El usuario define los horarios, y la simulación se ejecuta variando la cantidad de vehículos. Se inicia con un número de vehículos igual al número de plazas disponibles y luego se incrementa la población gradualmente, en incrementos de uno, hasta alcanzar un 250 % de la capacidad inicial del parqueo. Para cada cantidad de vehículos, se aplican 208 distribuciones distintas, repartiendo los vehículos entre los diferentes horarios.

5.6.4. Variables de Estado

- **Número de vehículos estacionados**: Cantidad de vehículos actualmente en el estacionamiento.
- **Número de vehículos en cola**: Cantidad de vehículos esperando un espacio en el parqueo.
- **Tiempo de espera en la cola**: Tiempo promedio que un vehículo debe esperar para encontrar espacio.
- **Cantidad de alumnos que se quedaran a Almorzar**: La cantidad de alumnos que, debido a su horario, salen entre la 1:00 y 3:00 PM y deciden quedarse a almorzar.
- **Cantidad de alumnos que saldrán en su tiempo libre**: La cantidad de alumnos que poseen un tiempo libre entre clases y desean salir y luego regresar cuando tienen clases nuevamente

5.6.5. Resultados de la Simulación

Al final de cada día simulado, se recopilan estadísticas clave como:

- **Día de la simulación**.
- **Número de vehículos estacionados por día**.
- **Tiempo promedio de espera en la cola**.
- **Tiempo máximo de espera en la cola**.

- **Tiempo mínimo de espera en la cola**.
- **Número de vehículos rechazados por falta de espacio**.
- **Cantidad de alumnos que se quedaron a almorzar**.
- **Cantidad de alumnos que decidieron salir en su tiempo libre**.
- **Distribución de los horarios**.

Estos datos se analizan para evaluar el rendimiento del sistema bajo diferentes configuraciones.

5.6.6. Limitaciones de la Simulación

Existen algunas limitaciones en el modelo, tales como:

- No se considera factores como tráfico que pueden provocar que los alumnos no lleguen a la hora que se tiene prevista
- Los comportamientos de los estudiantes están simplificados para facilitar la simulación. Un estudio Sociológico podría permitir que el comportamiento sea más complejo.

5.7. Validación y Verificación

5.7.1. Validación del Modelo

La validación del modelo se realizó siguiendo estos pasos:

1. **Caso Base:** Se verificó que la simulación funcionara correctamente cuando la cantidad de vehículos era igual a la cantidad de parqueos disponibles. En este escenario, se comprobó que todos los vehículos eran capaces de estacionarse sin problemas, y el modelo se comportó de acuerdo con las expectativas.
2. **Escenario con Sobrecarga:** Se introdujo un vehículo adicional al número de parqueos disponibles para evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de sobrecarga. Inicialmente, los vehículos no utilizaban distribuciones para tomar decisiones, lo que resultaba en un patrón predecible donde el vehículo adicional siempre quedaba fuera y debía esperar el mismo tiempo. Esta prueba aseguró que la lógica básica de la simulación era correcta.
3. **Incorporación de Distribuciones:** Posteriormente, se implementaron distribuciones probabilísticas para las decisiones de los vehículos. Esto incluyó la llegada aleatoria, la decisión de quedarse a almorzar y el ajuste del horario de llegada. La validación se centró en asegurar que estas distribuciones se comportaran según lo esperado y que la simulación reflejara las decisiones probabilísticas de manera realista.

5.7.2. Verificación de la Simulación

Para verificar que la simulación está produciendo resultados acotados por las condiciones del estudio, se deben considerar las siguientes métricas:

- **Disponibilidad de Parqueos:** En el transcurso de los 30 días de simulación, no debe haber un patrón en el que todos los días un vehículo no logre encontrar parqueo. Si esto ocurre, indica que el sistema está rechazando vehículos de manera sistemática y no está cumpliendo con la condición de que ningún alumno se quede sin parqueo.
- **Maximización de Ganancia:** No es aceptable que haya un parqueo libre todos los días en la simulación. Esto indicaría que la simulación no está maximizando el uso del espacio disponible y, por lo tanto, no está alcanzando la ganancia máxima posible. Se debe verificar que el porcentaje de parqueos ocupados se mantenga alto durante todo el período simulado.

Estas métricas se visualizarán en un histograma donde el eje Y representará la cantidad total de vehículos, y cada barra estará dividida en segmentos de diferentes colores, los cuales indicarán la cantidad de vehículos asignados a cada horario específico. Además, se incluirán líneas de tendencia que mostrarán el promedio diario de alumnos que almorzaron, el promedio de carros sin atender y el mínimo de carros sin atender. Esto permitirá analizar los resultados de cada simulación de manera más clara y detallada.

CAPÍTULO 6

Resultados

Cada simulación emuló un período de 30 días, durante los cuales todos los vehículos intentaron utilizar el estacionamiento, tomando decisiones que influían en su permanencia o en la posibilidad de salir y luego regresar. Al final de cada día, se registraban métricas detalladas de cada vehículo, generando una entrada diaria en un archivo CSV para esa simulación. Los datos recolectados incluían el día, el tiempo total de espera, el tiempo mínimo y máximo de espera, la cantidad de parqueos disponibles, la cantidad de vehículos no atendidos, el número de estudiantes que decidieron quedarse a almorzar, el total de alumnos presentes y la distribución utilizada en la simulación.

Estos datos fueron representados mediante un diagrama de barras, donde cada barra muestra la cantidad total de vehículos en esa simulación. Las barras están segmentadas en distintos colores, que representan la cantidad de vehículos en cada franja horaria. Además, se incluyeron tres líneas de tendencia que permiten visualizar el comportamiento a lo largo de la simulación. Estas líneas representan: el promedio diario de estudiantes que decidieron quedarse a almorzar, el promedio diario de vehículos no atendidos y el valor mínimo de vehículos no atendidos.

Cada simulación generó múltiples gráficas que reflejan las distintas iteraciones con diversas distribuciones y poblaciones de vehículos. En este capítulo de resultados, únicamente se presentan aquellas gráficas que contienen la simulación con la mayor población vehicular, en la cual el promedio de vehículos no atendidos es cero. Para consultar el resto de los resultados, se puede acudir al apartado de anexos.

El óptimo de cada simulación se identifica cuando el promedio de vehículos no atendidos es cero, lo que implica que, durante los 30 días de simulación, no hubo un solo día en que algún vehículo no pudiera ingresar. Si bien este cruce con cero ocurre en otras ocasiones, solo se destaca la simulación con la mayor población vehicular, las cuales se presentan en este capítulo para cada configuración de plazas de parqueo, véase de la gráfica 1 a la 6.

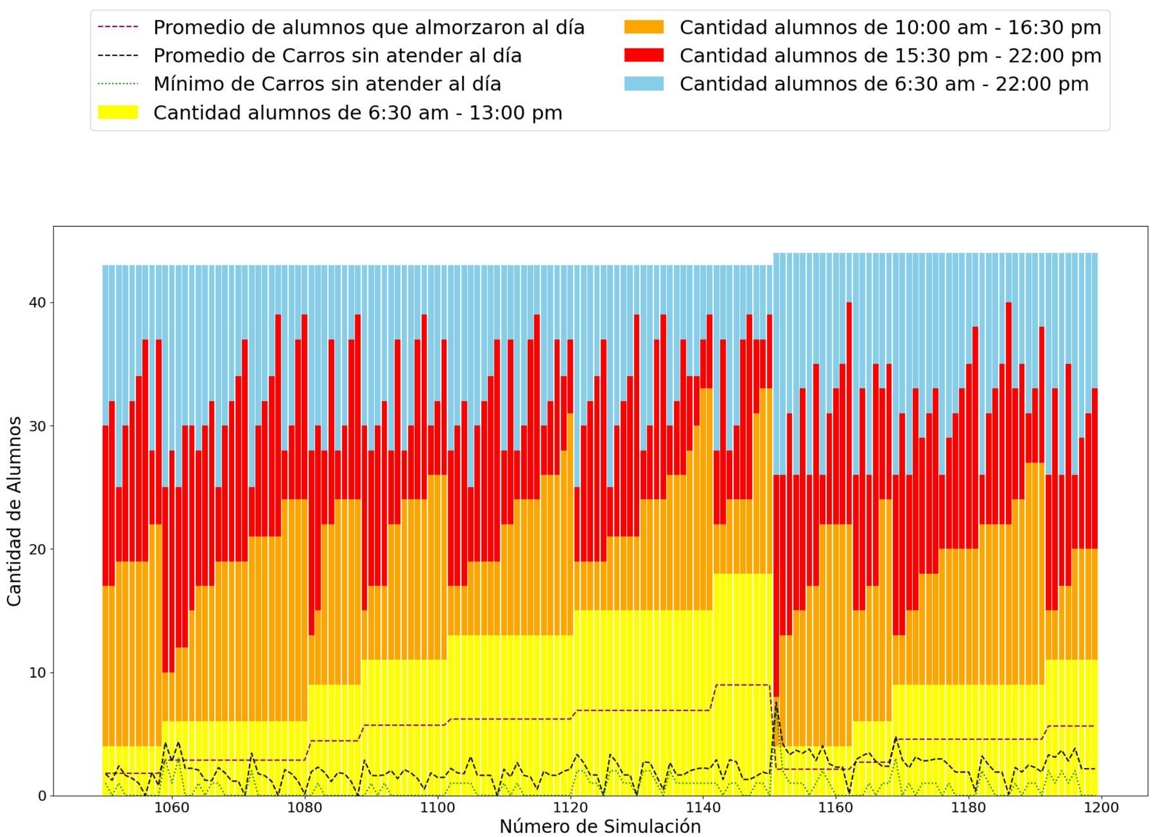

Figura 1: Resultados de simulaciones de 25 parqueos - Grupo 8: Simulaciones 1051 a 1200)

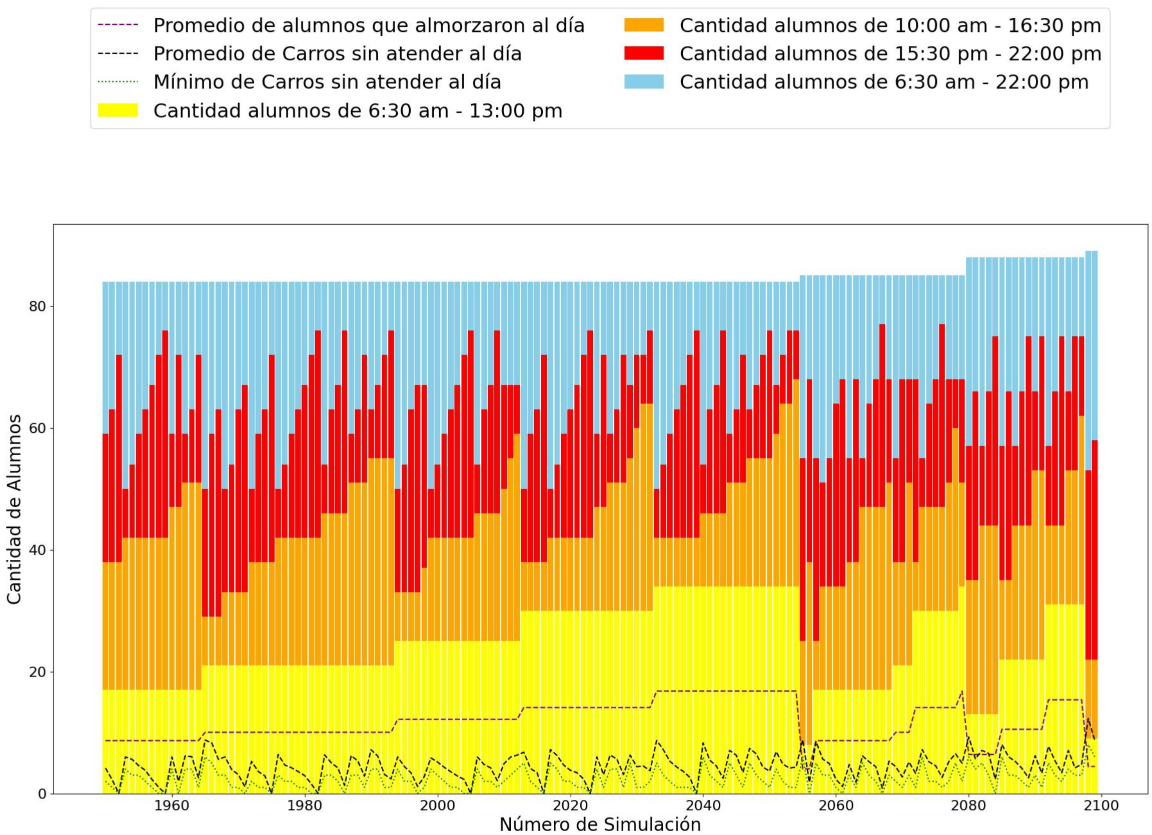

Figura 2: Resultados de simulaciones de 50 parqueos - Grupo 14: Simulaciones 1951 a 2100)

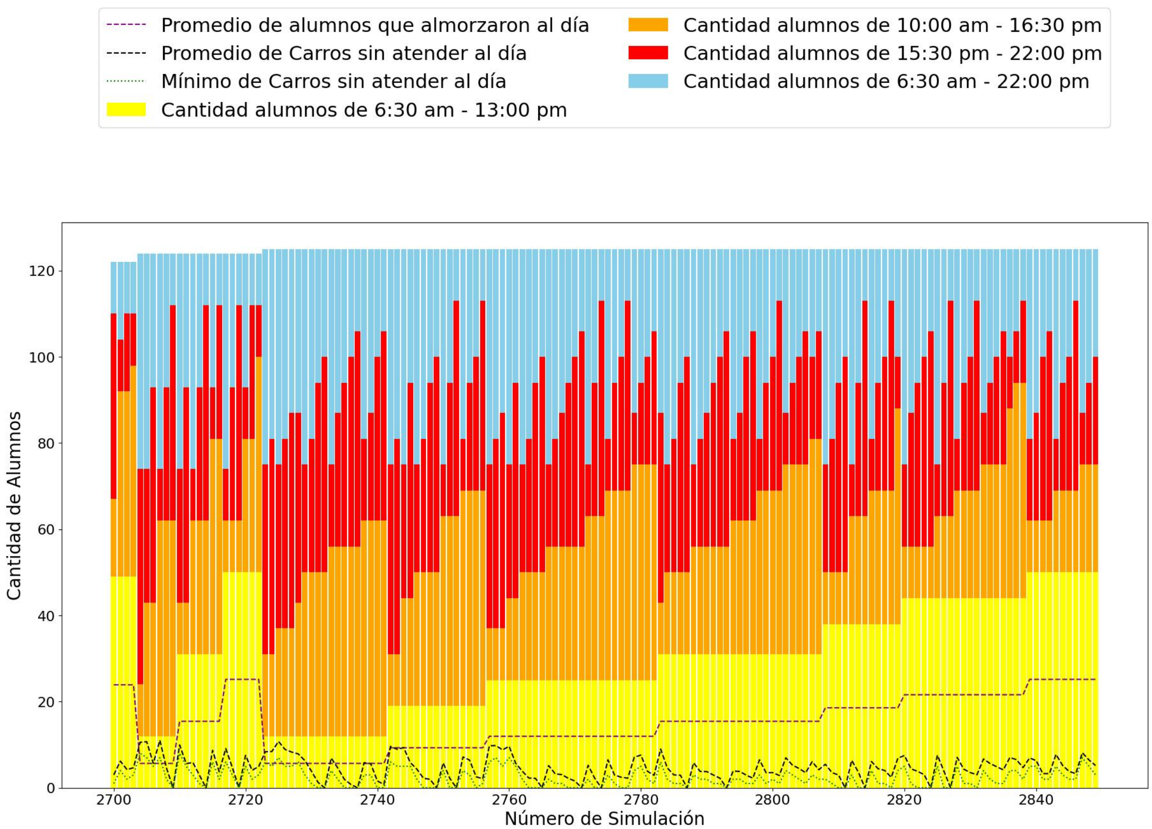

Figura 3: Resultados de simulaciones de 75 parqueos - Grupo 19: Simulaciones 2701 a 2850)

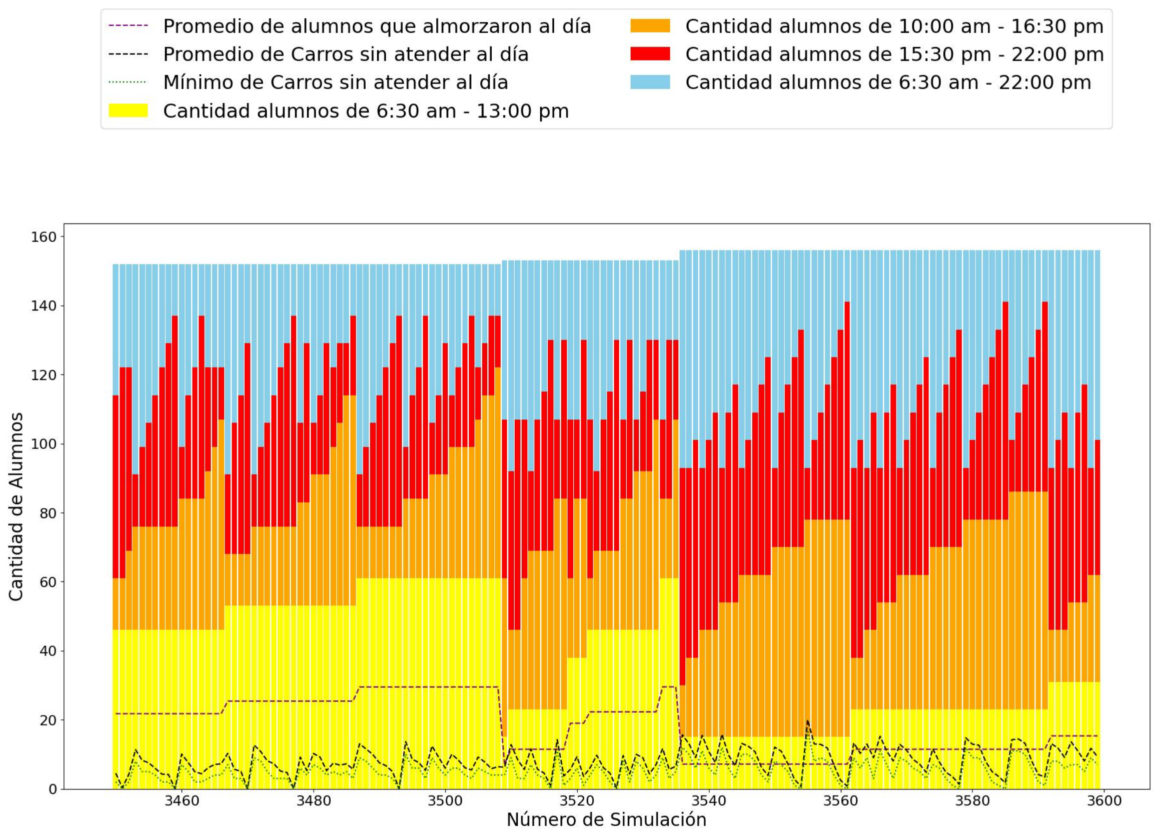

Figura 4: Resultados de simulaciones de 90 parqueos - Grupo 24: Simulaciones 3451 a 3600)

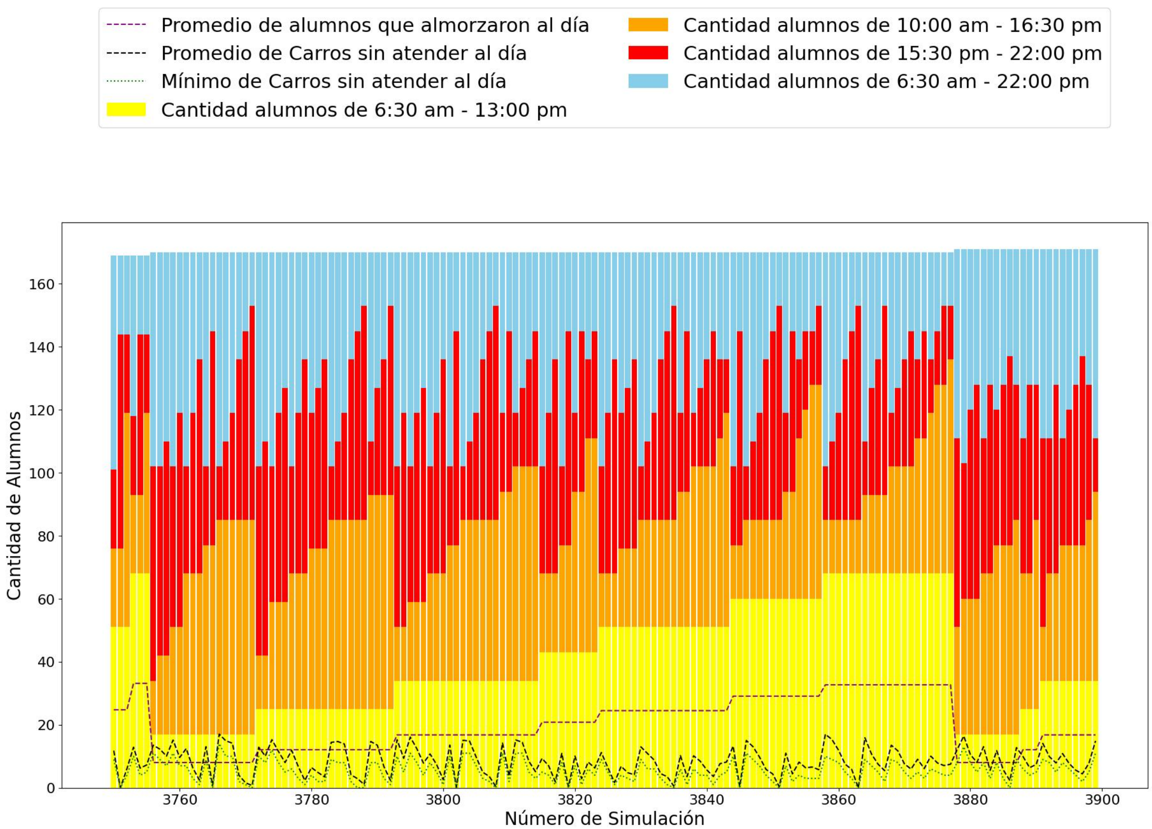

Figura 5: Resultados de simulaciones de 100 parqueos - Grupo 26: Simulaciones 3751 a 3900)

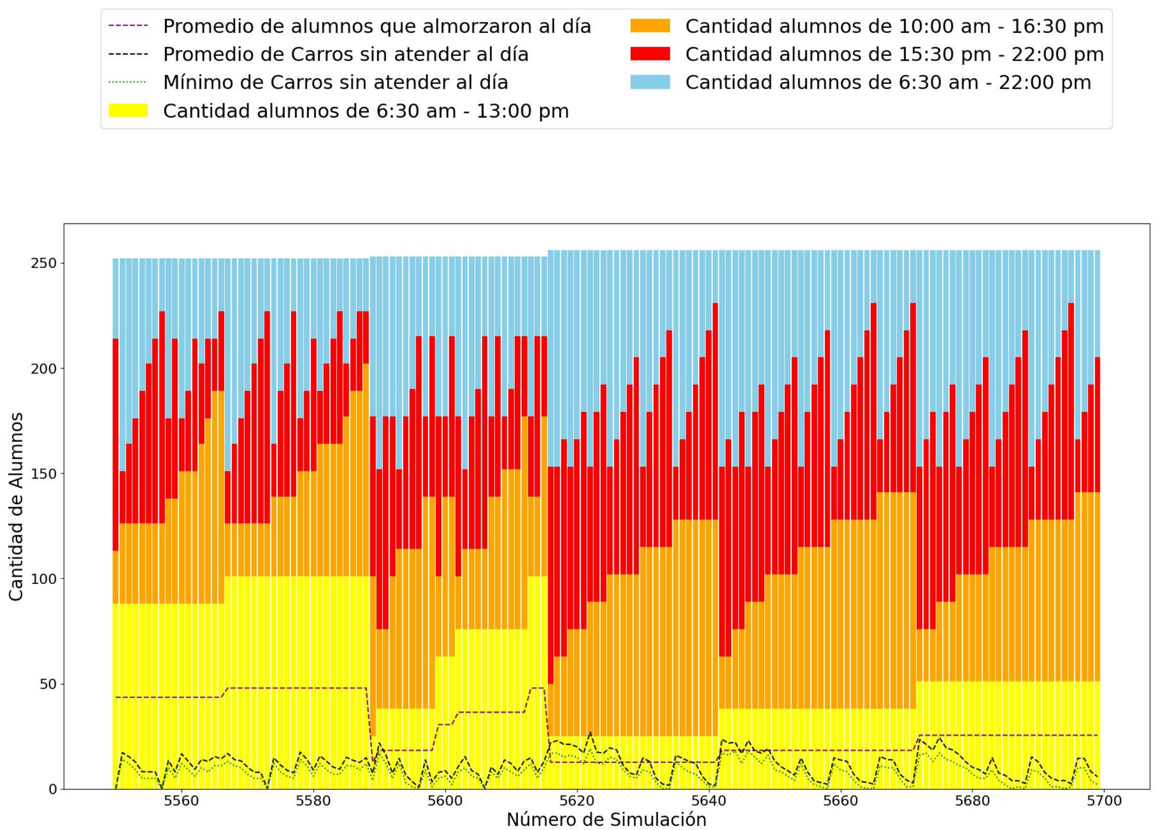

Figura 6: Resultados de simulaciones de 150 parqueos - Grupo 38: Simulaciones 5551 a 5700)

Para analizar si existe una relación entre los valores óptimos obtenidos en cada configuración de plazas de parqueo, se realizaron regresiones exponenciales, logarítmicas y polinómicas de primer, segundo y tercer grado. En la gráfica 7 se observa que las regresiones polinómicas se ajustan mejor a los valores óptimos, mostrando intersecciones con ellos, en contraste con las regresiones exponencial y logarítmica, las cuales no presentan este comportamiento (ver 8).

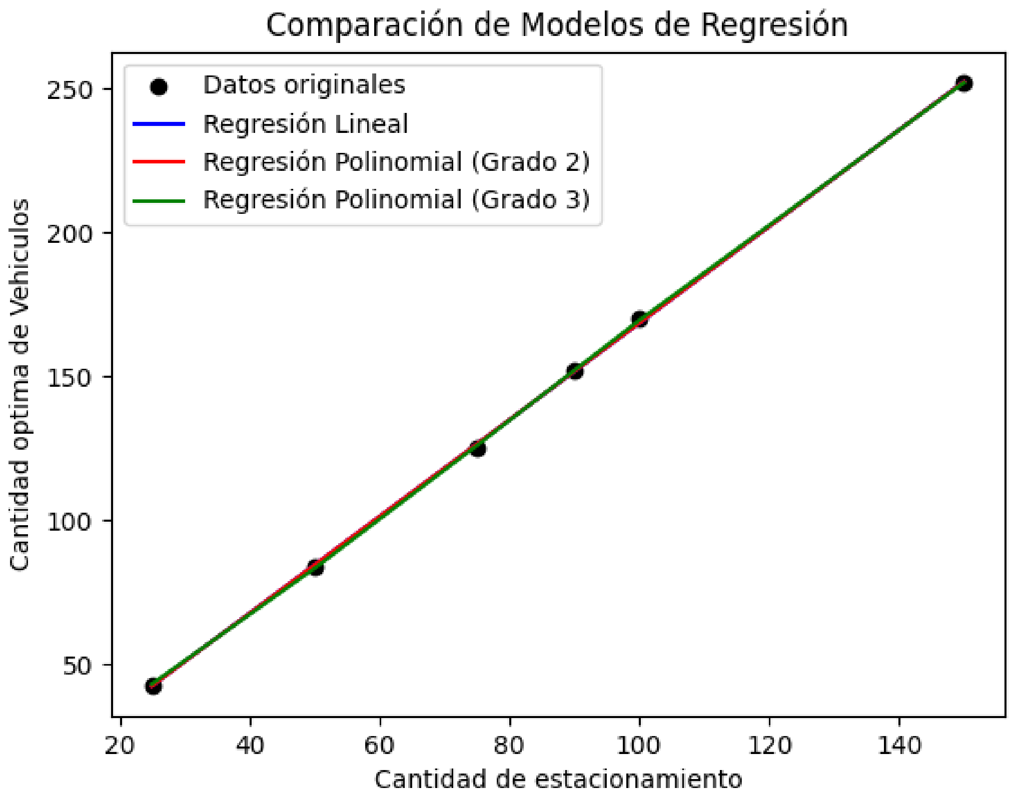

Figura 7: Regresión lineal y polinómica de cantidades optimas de las simulaciones

Grado de regresión	R^2	Función
1	0.9997975876939106	$f(x) = 1.6792x + 0.5249$
2	0.9997979053341682	$f(x) = -2.1933 \times 10^{-5}x^2 + 1.6831x + 0.3913$
3	0.9999333625076362	$f(x) = -1.8704 \times 10^{-5}x^3 + 0.0048x^2 + 1.3182x + 7.4786$

Cuadro 1: Regresiones sobre los valores óptimos de las simulaciones

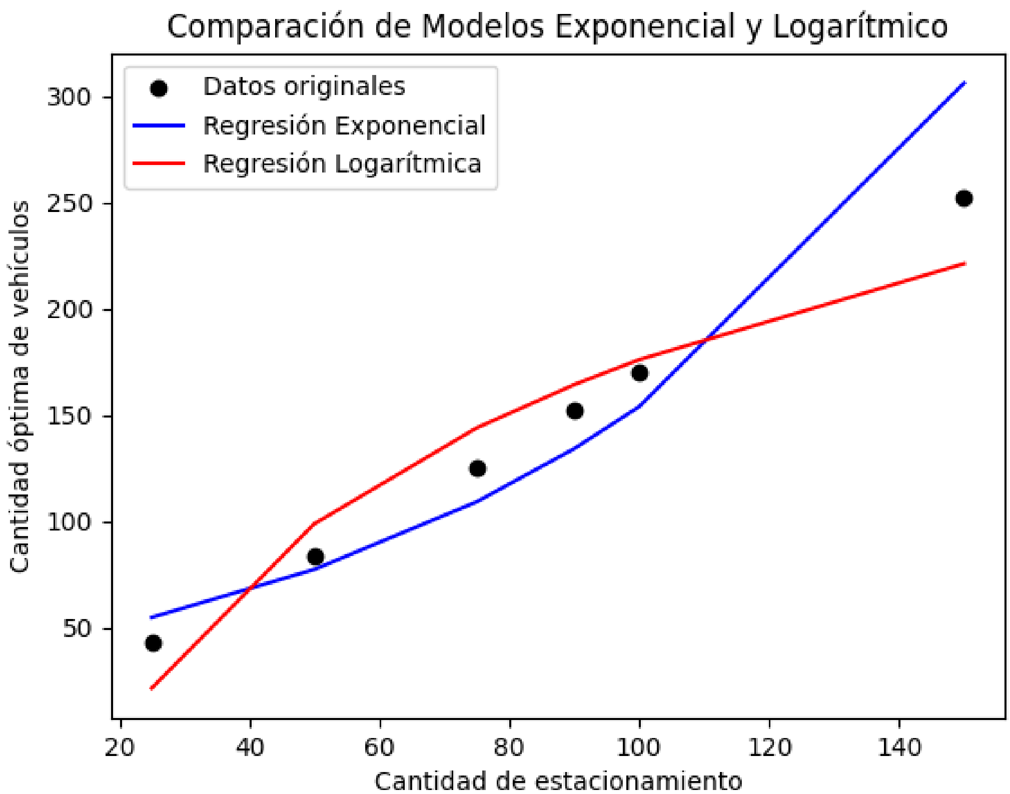

Figura 8: Regresión exponencial y logarítmica de cantidades optimas de las simulaciones

Tipo de Regresión	R^2	Función
Exponencial	0.8507	$f(x) = 38.97 \cdot e^{0.01x}$
Logarítmica	0.9174	$f(x) = -336.69 + 111.33 \cdot \ln(x)$

Cuadro 2: Resultados de las regresiones exponencial y logarítmica

CAPÍTULO 7

Discusión

El objetivo general de esta investigación era determinar, mediante una simulación computacional, la cantidad adecuada de asignaciones de parqueo a vender a los estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala en su sede central. Para abordar este objetivo, se desarrolló una simulación basada en agentes, una metodología particularmente útil en el estudio de fenómenos sociales complejos, ya que permite observar el comportamiento emergente que surge de las interacciones individuales. Este comportamiento emergente facilita la identificación de patrones colectivos sin necesidad de imponer reglas estrictas desde el inicio, permitiendo que las interacciones naturales entre agentes conduzcan a resultados que reflejan una realidad plausible. Desde la perspectiva de la teoría organizacional, la simulación basada en agentes ofrece una ventaja significativa al modelar sistemas complejos donde la adaptación y la autonomía de los agentes juegan un papel crucial. Así, esta metodología no solo simplifica la modelación de decisiones individuales y colectivas, sino que también permite analizar cómo las políticas de asignación de recursos pueden influir en el sistema en su conjunto.

Una vez se definieron las reglas y comportamientos a utilizar por parte del ambiente (plazas de parqueo) y los agentes (vehículos), se simuló una versión de prueba con 100 estacionamientos. Se definieron 4 horarios: matutino (6:30 AM a 1:00 PM), vespertino (10:00 AM a 4:30 PM), nocturno (3:30 PM a 10:00 PM) y horario completo (6:30 AM a 10:00 PM). La idea de utilizar estos horarios era simular bajo una distribución equilibrada durante toda la semana, como recomiendan Michael Carter y Gilbert Laporte de la Universidad de Toronto en su estudio Recent Developments in Practical Course Timetabling [17]. Además, se agregó el horario completo con el fin de abarcar a aquellos alumnos que, por motivos personales o académicos, tienen horarios mezclados, han perdido clases o sus horarios ya no siguen un orden estándar como el resto de los estudiantes.

Dado que se busca determinar el número adecuado de parqueos a vender, era necesario que la simulación se llevara a cabo aumentando progresivamente la cantidad de personas que utilizan el servicio. Se tomó como caso base mínimo que la cantidad de personas fuera equivalente a la cantidad de parqueos, ya que utilizar menos personas no tendría sentido. Posteriormente, la población se fue incrementando de 1 en 1 hasta alcanzar una población 2.5 veces mayor a la cantidad de parqueos.

Como se observa en la gráfica 5, para 100 parqueos, la capacidad máxima es de 170 alumnos, distribuidos de la siguiente manera: 68 alumnos en el horario matutino, 17 en el vespertino, 68 en el nocturno y 17 en el horario completo. Se determinó esto, debido a que la línea discontinua negra toca por última vez el eje X cuando la población tiene la configuración mencionada. Aunque se puede apreciar que dicha línea se aproxima a 0 en otras poblaciones más grandes, es importante recordar que el objetivo de esta simulación era identificar la máxima población en la que ningún vehículo fuera rechazado, la universidad obtuviera el mayor beneficio posible y no se violaran las regulaciones municipales. Por lo tanto, bajo estas condiciones, el número óptimo es 170 alumnos.

Se puede asegurar que estas condiciones se cumplen por los siguientes motivos: las regulaciones municipales son respetadas, ya que, sí se indica que el parqueo tiene 100 espacios establecidos, al llenarse no se utilizan áreas no designadas para estacionar. Ningún alumno llegó al parqueo y no consiguió lugar antes de que su horario de clases concluyera. La última condición, que es que la universidad obtenga la máxima ganancia posible, también se cumple, dado que se seleccionó la población más grande en la que se respetan las dos condiciones anteriores.

No obstante, la simulación realizada con 100 parqueos no proporciona un resultado concluyente, ya que este representa solo un valor específico. La universidad cuenta con varios estacionamientos, cada uno con diferentes cantidades de espacios, por lo que sería necesario ejecutar la simulación para cada parqueo con su número exacto de plazas. Dado que la simulación es minuciosa y evalúa 208 distribuciones horarias por cada población durante un periodo de 30 días, simulaciones para estacionamientos más grandes, como el del Centro de Innovación y Tecnología (CIT), podrían tomar varios días en completarse. Tomando como punto de partida que la simulación de 100 plazas demora aproximadamente un día real, fue necesario implementar herramientas adicionales, como macros de mouse, para reabrir automáticamente la ventana de Visual Studio cuando esta se colapsaba. Por esta razón, se optó por investigar si existe una tendencia o función que permita aproximar los resultados mediante una regresión. Para ello, se realizaron nuevas simulaciones con diferentes cantidades de parqueos: 25, 50, 75, 90 y 150.

Para estas nuevas simulaciones, se mantuvieron los mismos parámetros, modificando únicamente la cantidad de plazas de parqueo. Los resultados fueron los siguientes: para un parqueo con 25 plazas, la capacidad máxima fue de 43 alumnos; para 50 plazas, fue de 84; para 75 plazas, 125; para 90 plazas, 152; y para 150 plazas, 252. Cada simulación tuvo como resultado un único valor óptimo, que se debe a la estacionalidad del comportamiento de los agentes, lo cual refleja una representación del comportamiento sociológico. Esto se puede observar en las gráficas 1 a 6, ya que la línea discontinua negra toca por última vez el eje X en estos valores.

A continuación, se buscó alguna relación en los resultados, comenzando por realizar regresiones de primer, segundo y tercer grado, como se muestra en la gráfica 7. Todas las regresiones se ajustan bastante bien a los datos. Sin embargo, dado los resultados del cuadro

7, se puede observar que el coeficiente de determinación (R^2) más alto corresponde a la regresión polinómica de tercer grado, con un valor de 0.9999333625076362. Esto significa que, si la universidad mantuviera un horario similar al simulado, no sería necesario realizar una simulación para cada parqueo; simplemente utilizando la función $f(x) = -1.8704 \times 10^{-5}x^3 + 0.0048x^2 + 1.3182x + 7.4786$, siendo x la cantidad de plazas de parqueo, se podría encontrar el valor óptimo de asignaciones a vender siempre y cuando la cantidad de parqueos fuera menor o igual a 150. En el caso de que la cantidad de parqueos sea superior a 150, sería necesario utilizar la función $f(x) = 1.6792x + 0.5249$.

Estos resultados son muy prometedores, ya que, aunque la universidad no utilice un horario idéntico al simulado, solo sería necesario repetir el proceso. Se establecería el horario en la simulación, se ejecutaría para algunas poblaciones con el objetivo de realizar regresiones y validar que existe una función que describa el comportamiento. En caso de que no existiera dicha función, no sería problemático, ya que la herramienta aún podría calcular el óptimo mediante simulación. Aunque esto tomaría más tiempo, los resultados se obtendrían de igual forma. Esto permite concluir que se alcanzó y cumplió el objetivo general de esta tesis.

CAPÍTULO 8

Conclusiones

A través de las simulaciones, se ha determinado que la cantidad óptima de asignaciones de parqueo a vender sigue una relación cúbica con respecto a la cantidad de plazas de estacionamiento disponibles. Esta relación está representada por la siguiente función:

$$f(x) = -1.8704 \times 10^{-5}x^3 + 0.0048x^2 + 1.3182x + 7.4786 \tag{1}$$

donde x representa la cantidad de plazas de parqueo y la cantidad de parqueos no supera 150. El modelo refleja que, a medida que aumenta la capacidad del estacionamiento, el número de asignaciones a vender crece de manera no lineal.

Se logró establecer un conjunto de reglas claras y efectivas que regulan el comportamiento de los usuarios del parqueo y que permiten llevar a cabo simulaciones apegadas a la realidad. Estas directrices abarcan aspectos como los horarios de entrada y salida de los vehículos, el uso extendido del parqueo debido al tiempo de almuerzo y las salidas de los vehículos causadas por tiempos libres en los horarios de los alumnos.

El modelo de simulación basado en agentes ha demostrado ser efectivo para representar la dinámica del estacionamiento. Esto se debe a que el comportamiento emergente de los agentes refleja de manera aproximada la realidad, lo que permitió determinar la cantidad óptima de plazas en cada simulación.

En conclusión, para que una simulación se considere exitosa en maximizar los beneficios para la universidad, garantizar que ningún agente sea rechazado en el servicio y cumplir con las regulaciones municipales, es fundamental que mantenga un promedio de cero vehículos sin atender durante los 30 días emulados. Además, esta condición debe evaluarse en la simulación que contemple la mayor población de agentes, y la cantidad de parqueos establecida al inicio de la simulación no puede incrementarse. El cumplimiento de estos criterios asegura la efectividad de la simulación en alcanzar los objetivos planteados.

CAPÍTULO 9

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se sugieren las siguientes recomendaciones para optimizar y mejorar el modelo de simulación, así como para la futura toma de decisiones en la gestión de asignaciones de parqueo en la Universidad del Valle de Guatemala:

1. **Realizar un estudio sociológico sobre el comportamiento de los estudiantes:** Una de las principales limitaciones del modelo desarrollado es la falta de información empírica detallada sobre los patrones reales de comportamiento de los estudiantes en relación con el uso de los estacionamientos. Actualmente, las distribuciones de probabilidad utilizadas en la simulación se basan en la teoría . Se recomienda llevar a cabo un estudio sociológico que explore aspectos como los hábitos de llegada y salida de los estudiantes, su uso de diferentes medios de transporte, y la fluctuación en la demanda de parqueos según eventos académicos o extracurriculares. Con esta información, se podrán ajustar de manera más precisa las distribuciones de probabilidad en la simulación, logrando un modelo que refleje con mayor exactitud el comportamiento real de la población estudiantil.

2. **Implementar simulaciones continuas con datos actualizados:** A medida que se disponga de más datos sobre el uso de los parqueos y los patrones de comportamiento de los estudiantes, se recomienda mantener una simulación continua y adaptativa que integre estos datos en tiempo real. Esto permitiría una mejor gestión de los espacios de parqueo, optimizando la asignación en función de la demanda actual y futura.

Adicionalmente se comparten recomendaciones para futuras investigaciones basadas en este trabajo.

1. **Deep Learning** Actualmente, abordar esta problemática con un enfoque de Deep Learning no es viable, debido a la falta de un conjunto de datos validado que permita entrenar un modelo para realizar predicciones confiables. Sin embargo, gracias

a la heurística generada por esta herramienta, ahora es posible iniciar un proceso de recolección de datos válidos. Esto sentará las bases para, en un futuro, implementar un enfoque de Deep Learning que permita abordar el problema de manera más precisa y automatizada.

2. **Escalabilidad de la solución** La herramienta de simulación es fácilmente escalable a otros problemas de estacionamiento. Esto se debe a que el agente cuenta con una función de acciones flexible, que permite agregar o eliminar funcionalidades para representar decisiones y acciones en distintos contextos. De esta forma, el modelo puede adaptarse para simular estacionamientos en entornos variados, como centros comerciales, restaurantes, hospitales, entre otros.

CAPÍTULO 10

Bibliografía

[1] R. M. Bolaños, *La venta de vehículos nuevos creció 18 % en Guatemala y estos fueron los más buscados*, Prensa Libre, feb. de 2024. dirección: https://www.prensalibre.com/economia/la-venta-de-vehiculos-nuevos-crecio-18-en-guatemala-y-estos-fueron-los-mas-buscados/ (visitado 24-03-2024).

[2] R. Moreno, "Estudio de estacionamiento y parqueaderos en la zona céntrica de la ciudad de Quibdó," *Unal.edu.co*, 2023. DOI: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85960. dirección: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85960 (visitado 27-05-2024).

[3] P. A. Samuelson y W. D. Nordhaus, *Economics*, 19.ª ed. New York: McGraw-Hill Education, 2010.

[4] Goparking, *LinkedIn*, Linkedin.com, 2024. dirección: https://www.linkedin.com/pulse/desaf%C3%ADos-y-soluciones-en-la-gesti%C3%B3n-de-grandes-estacionamientos-uuonf/ (visitado 27-05-2024).

[5] SYNTEC, *Simulación Computacional - Syntec Experiencia y Tecnología*, Syntec Experiencia y Tecnología, sep. de 2023. dirección: https://syntec.cl/servicios/simulacion-computacional/ (visitado 19-07-2024).

[6] J. F. López, *Variable aleatoria*, Rankia.com, feb. de 2024. dirección: https://www.rankia.com/diccionario/trading/variable-aleatoria (visitado 02-08-2024).

[7] pidat, *DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD*. dirección: https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda_Epidat_4_Distribuciones_de_probabilidad_Octubre2014.pdf.

[8] U. Nacional y A. De México, *DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD*. dirección: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24833w/M1DV109_S6_Distribucionesdeprobabilidad.pdf.

[9] T. O. .-. FasterCapital, *Teoria Organizacional - FasterCapital*, FasterCapital, 2024. dirección: https://fastercapital.com/es/palabra-clave/teoria-organizacional.html (visitado 22-07-2024).

[10] E. Equipo editorial, *Teoría Clásica de la Administración - Información y Resumen*, Concepto, oct. de 2020. dirección: https://concepto.de/teoria-clasica-de-la-administracion/ (visitado 22-07-2024).

[11] E. Equipo editorial, *Teoría de Sistemas - Concepto, principios, autor y enfoque*, Concepto, jul. de 2019. dirección: https://concepto.de/teoria-de-sistemas/ (visitado 22-07-2024).

[12] M. Quiroa, *¿Qué es la teoría de la contingencia? Características y principios*, Economipedia, feb. de 2021. dirección: https://economipedia.com/definiciones/teoria-de-la-contingencia.html (visitado 22-07-2024).

[13] M. J. Pruetula y K. M. Carley, "Computational organization theory: Autonomous agents and emergent behavior," *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 2024. DOI: 10.1080\/10919399409540216. dirección: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10919399409540216 (visitado 19-07-2024).

[14] H. Sayama, *19.1: ¿Qué son los modelos basados en agentes?* LibreTexts Español, oct. de 2022. dirección: https://espanol.libretexts.org/Matematicas/Computacion_Cientifica_Simulaciones_y_Modelado/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_al_Modelado_y_An%C3%A1lisis_de_Sistemas_Complejos_(Sayama)/19%3A_Modelos_basados_en_agentes/19.01%3A_%C2%BFQu%C3%A9_son_los_modelos_basados_en_agentes%3F (visitado 03-08-2024).

[15] Á. V. Torres, "Modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales: una aproximación al estado del arte," *Polis (Santiago)*, vol. 18, sep. de 2019. DOI: 10.32735/s0718-6568/2019-n53-1392. dirección: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-65682019000200282 (visitado 03-08-2024).

[16] C. Romero, A. Tisnés y S. Linares, "Modelo de simulacion del COVID-19 basado en agentes. Aplicacion al caso argentino," *Posicion*, vol. 3, 2020. dirección: https://www.aacademica.org/adela.tisnes/5 (visitado 03-08-2024).

[17] M. W. Carter y G. Laporte, "Recent developments in practical course timetabling," *Lecture Notes in Computer Science*, págs. 3-19, 1998. DOI: 10.1007/bfb0055878. (visitado 09-01-2020).

CAPÍTULO 11

Anexos

11.1. Repositorio de GitHub

Para más detalles sobre el código utilizado en las simulaciones y la generación de resultados, puede acceder al repositorio disponible en el siguiente enlace: https://github.com/Aristondo01/Tesis-Simulacion-de-Parqueo.

11.2. Resultados de todas las simulaciones

Para poder visualizar los resultados completos de las simulaciones se pueden consultar en el siguiente enlace de Google Drive:

https://drive.google.com/drive/folders/1zpjlQyftl94EFbPOq8Mqv9760cgEE2dB?usp=sharing.