

TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR

Simulación de la expansión del sistema de bicicletas públicas de Rosario

Boixadera, Lorian
D'Angelo, Agustín
Luna, Paulina
Spitteler, Marlene

Índice general

1	Introducción	5
1.1	Objetivo de Simulación	5
1.2	Descripción del tema	6
1.3	Sistema Mi Bici Tu Bici	6
1.3.1	¿Cómo funciona el sistema?	8
1.3.2	Bicis	8
1.3.3	Estaciones	9
1.4	Datos a emplear para fundamentar la investigación	10
1.4.1	Disposición geográfica de las estaciones instaladas	11
1.4.2	Contaminación	11
1.5	Aspectos a evaluar su inclusión en el estudio	12
2	Desarrollo del modelo de simulación	13
2.1	Definición del sistema en estudio	13
2.2	Generación del modelo de simulación base	14
2.3	Recolección y análisis de datos	14
2.4	Generación del modelo preliminar	15
2.5	Verificación del modelo	16
2.6	Validación del modelo	16
2.7	Generación del modelo final	16
2.8	Determinación de los escenarios	16
2.9	Análisis de sensibilidad	16
2.9.1	Selección del tamaño óptimo de muestra	18
2.10	Documentación del modelo, sugerencias y conclusiones	18
2.11	Modelo en AnyLogic	18
3	Análisis de Resultados	22
3.1	Comparación de los escenarios comparativos	22

4 Conclusiones 24

4.1 Conclusión General 24

5 Bibliografía 26

Bibliografía 26

1. Introducción

“Hoy en día, naciones, empresas e instituciones de todo el mundo buscan la fórmula para el crecimiento. Una gran parte de la solución está en la innovación sustentable”

Muthar Kent, CEO Coca-Cola.

En los últimos años, el crecimiento de la población y el deficiente servicio y planificación del transporte público de pasajeros, es decir, los colectivos urbanos e interurbanos, han provocado el congestionamiento de las grandes masas, especialmente en días laborables en las denominadas “horas pico”, ocasionando que el traslado de un punto a otro dentro de la ciudad y hacia las periferias se convierta en un recorrido tedioso, frustrante e innecesariamente lento, cuando son trayectos que normalmente se podrían realizar de forma más rápida y sin tan elevados niveles de estrés y contaminación.

Frente a estos inconvenientes, la movilidad sustentable pasó a ser un tema de gran relevancia en los últimos tiempos para planificar los sistemas de movilidad urbana, ya que es un modelo que promueve la utilización de medios de transporte que son amigables con el medio ambiente, incluyentes y económicamente accesibles. Estos tipos de movilidad sustentable tienen múltiples beneficios para el medio ambiente y para el ámbito social.

En este trabajo se resalta el uso de la bicicleta como medio de transporte sustentable, ya que no emiten gases contaminantes ni desperdician energía y, con respecto a los beneficios sociales, vemos que es un medio que implica actividad física, por lo que ayuda a llevar un estilo de vida más saludable. Además es un medio de transporte colectivo e individual que promueve una mayor inclusión y es una alternativa viable para recorrer grandes o medianas distancias a un costo bajo en comparación con los medios tradicionales.

1.1. Objetivo de Simulación

En el presente proyecto, se realizará una simulación del sistema de Mi Bici Tu Bici de Rosario, evaluando el beneficio ambiental al incorporar más anclajes en las estaciones ubicadas en puntos de alta

densidad de circulación en la ciudad de Rosario o al incorporar una nueva estación de capacidad equiparable en dicha zona.

1.2. Descripción del tema

La empresa Movi de Rosario se encuentra actualmente en ampliación del sistema Mi Bici Tu Bici a lo largo y ancho de toda la ciudad. Afirman que este plan de expansión comenzó antes de la pandemia, y el contexto aceleró el proceso. En este proyecto se busca plasmar el sistema de bicicletas públicas de Rosario desde el punto de vista ambiental.

Nuestro principal punto de interés es poder determinar si es más conveniente incorporar una estación extra en zona centro de Rosario o si, por el contrario, conviene sumarle anclajes y bicis a estaciones ya existente ubicadas en la misma zona. Para ello evaluamos el impacto ambiental que conllevaría poder hacerlo considerando los beneficios correspondientes basándonos en datos recolectados por años anteriores.

Es de vital importancia poder apostar por una movilidad sostenible no solo para una mejor calidad de vida sino también por los beneficios ambientales, bienestares económicos, sociales y de tránsito superiores. Al expandirse este sistema, conociendo la presente situación actual, se busca poder incentivar más a los ciudadanos a usar medios de transporte sustentable con la finalidad de poder reducir las emisiones de gases contaminantes e incidentes de tránsitos.

1.3. Sistema Mi Bici Tu Bici

Es una red de transporte público basada en el alquiler de bicicletas. Al ser automatizado se pueden extraer los rodados los 365 días del año las 24 hs. El usuario puede extraer la bicicleta de la estación, usarla para realizar un viaje y devolverla en la estación más cercana de su destino siempre que esté suscripto al sistema. Mi Bici Tu Bici cuenta con 614 bicicletas operativas distribuidas en 72 estaciones ubicadas en lugares estratégicos de la ciudad.

Gracias a esta iniciativa, que tuvo lugar a fines de Marzo de 2015, Rosario ofrece un nuevo sistema de transporte público accesible y saludable, de recorrido variable y personalizado, complementario al sistema de Transporte Urbano de Pasajeros, con el objetivo de promover el uso de la bicicleta como modo de movilidad sustentable y eficiente.

Para poder utilizar el sistema es necesario inscribirse previamente como **USUARIO MOVI** - y acceder al uso del sistema con tu tarjeta MOVI- o como **USUARIO TURISTA** -y acceder al uso del sistema con Tarjeta de Crédito-.

Una vez registrada la persona, con **la APP Mi Bici Tu Bici**, se puede consultar en tiempo real la disponibilidad de bicicletas y anclajes, ingresar el origen y destino de los viajes para recibir recomendaciones sobre el camino a recorrer, elegir estaciones favoritas, armar rutas preferidas, comprar abonos, usar el cronómetro y programar alarmas, reportar fallas, entre otras.

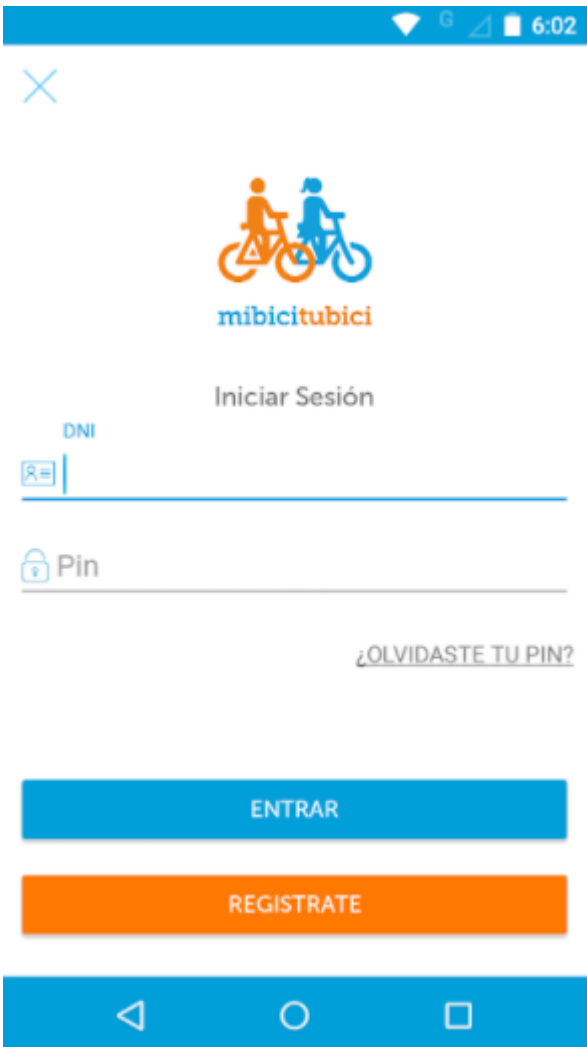


Figura 1.1: Login de la app MiBiciTuBici

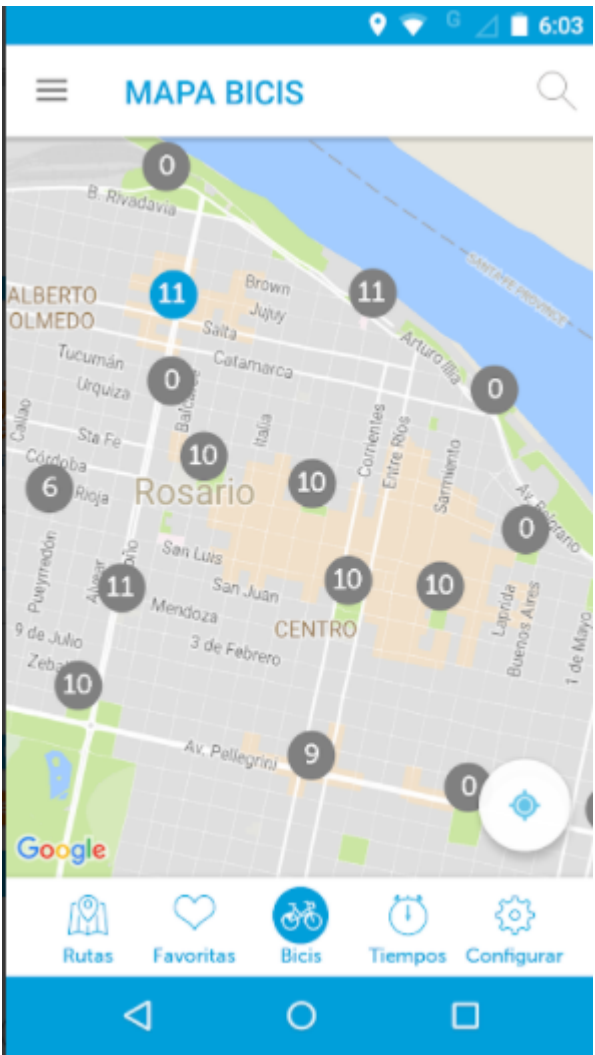


Figura 1.2: App MiBiciTuBici

1.3.1. ¿Cómo funciona el sistema?

Dependiendo de si se trata de un *Usuario Movi* o un *Usuario Turista*, tenemos dos posibles formas de usar el sistema:

USUARIO MOVI

- **Paso 1:** Apoyá tu tarjeta MOVI, ingresá tu contraseña (PIN) y presioná Enter.
- **Paso 2:** En caso de no contar con un abono, elegí la opción que desees y apoyá nuevamente la tarjeta MOVI para descontar el saldo.
- **Paso 3:** Ingresá en el teclado el número de anclaje de la bicicleta a retirar. Una vez que se emita un sonido y una luz verde, la bici podrá ser extraída. En caso de tiempo de uso adicional recibirás al correo electrónico una notificación del saldo generado (ver cuadro tarifario).
- **Paso 4:** Podés devolver la bici en cualquier estación habilitada. En caso de no encontrar un anclaje libre, apoyá tu Tarjeta MOVI en la zona delimitada y recibirás un tiempo de cortesía de 30 minutos para anclarla en la estación más próxima.
- **Paso 5:** Una vez que el rodado se encuentre correctamente anclado se detiene el cómputo de tiempo de uso y se finaliza el préstamo. En las nuevas estaciones el anclaje no solo emitirá una luz verde sino también un sonido, confirmando de esta manera el cierre correcto del viaje.

USUARIO TURISTA

- **Paso 1:** Generá una clave temporal (Token) desde tu perfil o desde la APP Mi bici tu bici (recordá que expira a los 30 minutos).
- **Paso 2:** Seleccioná F1 en el teclado, ingresá la clave temporal (Token) y presioná Enter.
- **Paso 3:** Ingresá en el teclado el número de anclaje de la bicicleta a retirar. Una vez que se emita un sonido y una luz verde, la bici podrá ser extraída. En caso de tiempo de uso adicional recibirás al correo electrónico una notificación del saldo generado (ver cuadro tarifario).
- **Paso 4:** Podés devolver la bici en cualquier estación habilitada. En caso de no encontrar un anclaje libre, presioná F1 en el teclado, ingresá nuevamente la clave temporal (Token) y recibirás un tiempo de cortesía de 30 minutos para anclarla en la estación más próxima.
- **Paso 5:** Una vez que el rodado se encuentre correctamente anclado, se detiene el cómputo de tiempo de uso y se finaliza el préstamo. En las nuevas estaciones el anclaje no solo emitirá una luz verde sino también un sonido, confirmando de esta manera el cierre correcto del viaje.

1.3.2. Bicis

Los rodados que integran Mi bici Tu Bici actualmente son 625, fueron diseñados pensando en la comodidad de los ciclistas al momento de movilizarse por la ciudad de Rosario. En cuanto a sus características, podemos nombrar

- Son bicis de 26 pulgadas y tienen cuadro de acero.
- Cuentan con una identificación numérica calada en chapa.

Además, podemos mencionar que poseen, entre otras:

- Llantas de doble pared y aluminio
- Sistema de frenos “v-brake” de rueda delantera y trasera
- Elementos reflectivos delanteros y traseros (blancos y rojos respectivamente) y laterales amarillos en ruedas
- Canasto
- Luces delantera y trasera, que funcionan con energía solar



Figura 1.3: Rodados que integran Mi bici Tu Bici

1.3.3. Estaciones

Las estaciones son puestos fijos automatizados con un módulo madre y puntos de anclaje para bicicletas pertenecientes al Sistema. Se dispone una relación de ocupación de las estaciones tendiente a una bicicleta cada 2 anclajes, a fin de contar con la capacidad suficiente para que los usuarios puedan encontrar bicicletas disponibles y anclajes libres para poder devolverlas.



Figura 1.4: Estaciones que integran Mi Bici Tu Bici

El sistema se encuentra monitoreado permanentemente por el Centro de Monitoreo de la Movilidad. Dicho centro reúne la información referida al funcionamiento de los diversos modos de desplazamiento en la ciudad, generando una mejor coordinación de la información para una planificación operativa de forma integral.

Actualmente, el sistema cuenta con 72 estaciones distribuidas en puntos claves de la ciudad de Rosario. Sus ubicaciones quedan representadas en la siguiente figura:

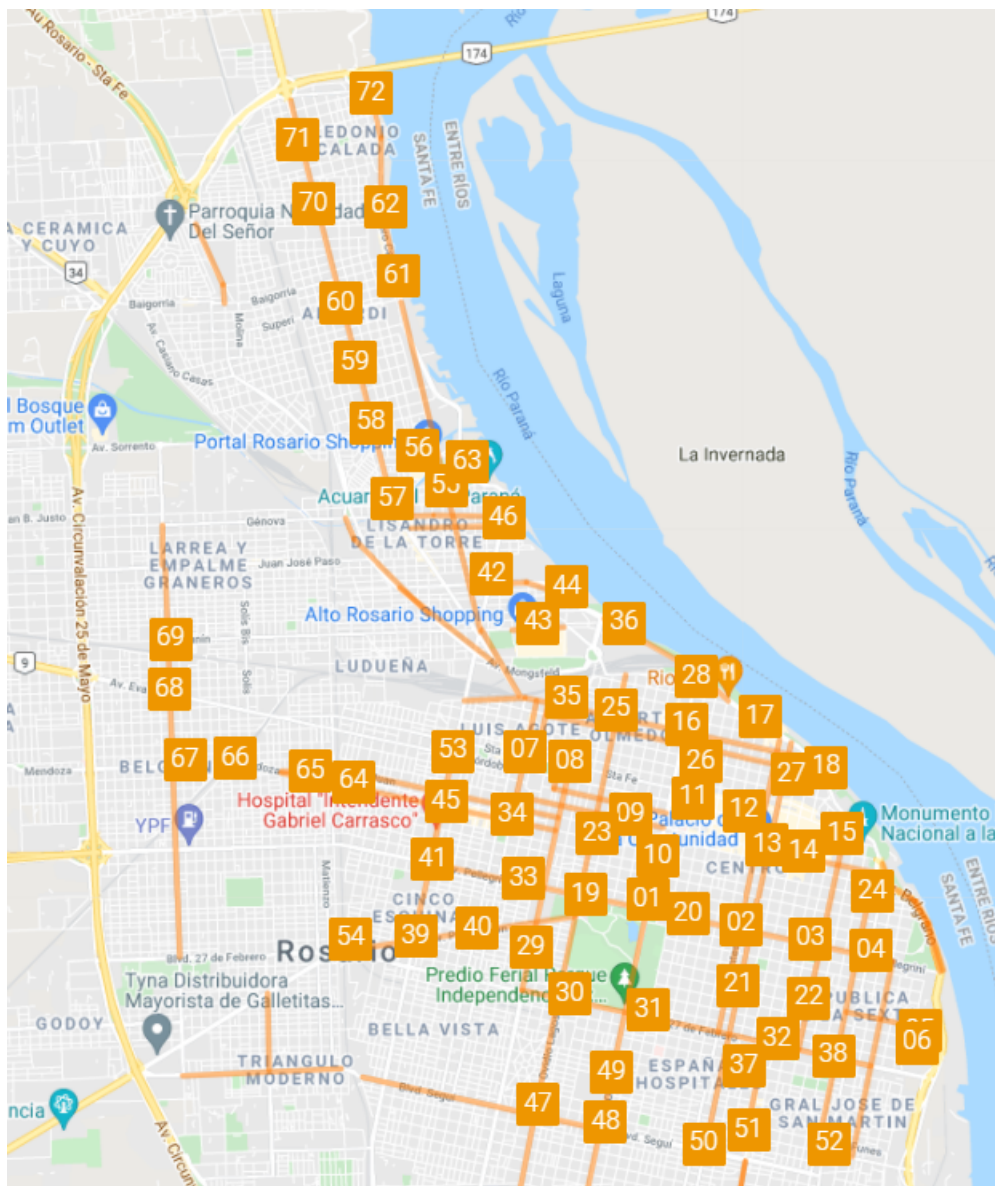


Figura 1.5: Ubicación de las 72 estaciones que integran Mi Bici Tu bici en la ciudad de Rosario

1.4. Datos a emplear para fundamentar la investigación

La municipalidad de la ciudad de Rosario cuenta con un portal con conjuntos de datos abierto a la comunidad. En las secciones posteriores de este documento, se detallan las principales fuentes de infor-

mación que allí se proveen y que se utilizarán como fundamento para las estimaciones que se realizarán en el desarrollo del estudio.

1.4.1. Disposición geográfica de las estaciones instaladas

Se utilizarán las coordenadas geográficas de las estaciones que actualmente se encuentran en funcionamiento para realizar un modelo que mejor se ajuste al escenario real. La disposición de las estaciones es de suma importancia dado que una de las restricciones a las que debería sujetarse una nueva estación, es la de no estar ubicada muy lejana a las otras o bien ubicarla entre las críticas.

1.4.2. Contaminación

Cuando nos enfocamos en el área de movilidad no podíamos dejar de lado uno de los problemas más críticos de la actualidad, siendo este el calentamiento global. Según expertos, uno de los gases que forman una buena parte del calentamiento global, que amenaza nuestras vidas, es el dióxido de carbono o más conocido por su fórmula CO₂.

El sector transporte, y de manera específica el tráfico vehicular, produce una de las mayores emisiones de contaminantes al aire a escala local, regional y global, debido a que la gran mayoría de vehículos motorizados utilizan combustibles fósiles. Conforme al **Plan Local de Acción Climática Rosario 2030** se expresa que, a nivel municipal, el total de emisiones de Inventario de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en 2018 fue de 3.197.804 toneladas de CO₂, es decir, 3.24 toneladas de CO₂ por persona, siendo el transporte el responsable del 34,2 % de esas emisiones.

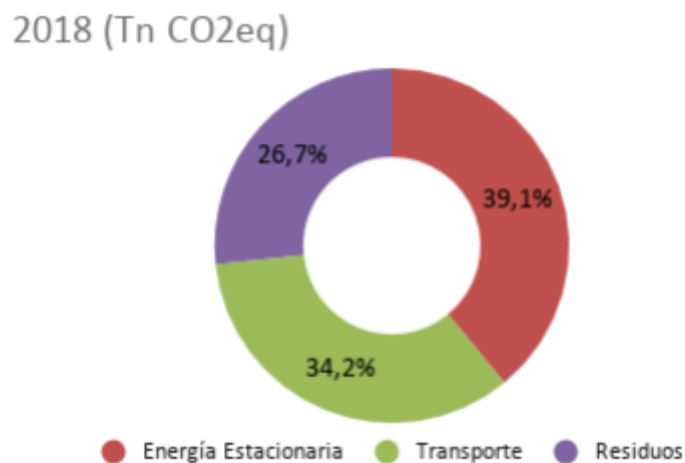


Figura 1.6: Resultados obtenidos (año base 2018)

Por consiguiente, en este trabajo se demuestra, a través de la simulación, la cantidad de emisión de CO₂ que se evita con el uso del Sistema Mi Bici Tu Bici al optar por un medio sustentable. Por medio de este análisis tratamos de promover un mayor uso del sistema y de medios de transportes sustentables, lo que conllevaría a una mejor calidad del aire. Aunque los efectos del cambio climático se transfieran a escala global, existe un factor muy importante en forma de contaminación atmosférica aportada por el transporte, por lo que las actuaciones deben estar dirigidas a lograr una movilidad sostenible que, además

de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, presenten co-beneficios a nivel local con impacto directo en mejoras en la calidad de vida de las personas.

1.5. Aspectos a evaluar su inclusión en el estudio

Algunos de los objetivos o lineamientos que nos planteamos discutir son:

1. **Evaluación del impacto en términos de beneficio ambiental que tendría la instalación de una nueva estación en puntos estratégicos de la ciudad.** Esto es fundamental dado que la evidencia presentada en la plataforma de datos abiertos muestra un claro crecimiento en el uso del servicio a partir del año 2017 y en la actualidad, el contexto de distanciamiento social que supone la actual pandemia aceleró aún más el crecimiento en la utilización de este medio de transporte en contraposición al medio de transporte público principal de la ciudad que es el colectivo.
2. **Evaluación de la capacidad y disponibilidad óptima de las estaciones con el objetivo de minimizar las falencias del sistema actual.** Las falencias identificadas hasta el momento son:
 - Algunas estaciones específicas, principalmente las del microcentro, suelen ocasionalmente quedarse sin bicicletas disponibles, lo que obliga al usuario a buscar otras estaciones más lejanas o incluso, a decantarse por tomar un colectivo en lugar de utilizar este medio de transporte sustentable.
 - Algunas estaciones suelen llenarse de bicicletas al punto de que no quedan anclajes disponibles. Esto obliga a aquellos usuarios que actualmente están realizando el recorrido tengan que buscar otras estaciones más lejanas a su destino original para poder devolver la bicicleta en tiempo y forma. En ocasiones, el hecho de tener que buscar otra estación implica un tiempo adicional de uso inesperado el cual es cargado al usuario de acuerdo al cuadro tarifario que se muestra en el sitio oficial del sistema. Si el ciclista se excede de los 60 minutos de uso preestablecidos, deberá abonar 1.5 veces el valor tarifario laboral, lo cual contribuye al descontento del usuario.

2. Desarrollo del modelo de simulación

“The goal of Simulation Modeling and Analysis is to give an up-to-date treatment of all the important aspects of a simulation study, including, modeling, simulation languages, validation and output data analysis”

Averill M. Law and W. David Kelton

La simulación es una herramienta muy potente tanto como para la evaluación y análisis de nuevos sistemas, como para el de los ya existentes. Gracias a ella podemos reproducir distintos procesos y así estudiar su comportamiento para analizar el impacto de los posibles cambios, o para comparar diferentes alternativas de diseño sin el alto coste que conllevarían los experimentos a escala real. Gracias a los grandes avances de la tecnología, hay una amplia variedad de software en el mercado especializado en esta área. El software de simulación utilizado, para representar y simular el Sistema Mi Bici Tu Bici de Rosario en este trabajo, es AnyLogic. AnyLogic es una poderosa herramienta desarrollada por AnyLogic Company que incluye todos los métodos de simulación más utilizados en la práctica actual.

2.1. Definición del sistema en estudio

Para poder desarrollar este modelo, primero nos enfocamos en la definición del sistema que queríamos modelar. En esta etapa definimos el problema en concreto, hicimos algunos supuestos con respecto al sistema, establecimos el alcance del mismo, definiendo lo que íbamos a considerar y lo que no, y además, establecimos los elementos que iban a aparecer. No solo eso, sino que también hicimos hincapié en las variables de decisión necesarias a evaluar para cumplir nuestro objetivo de la simulación, siendo estas, principalmente, medidas relacionadas con el uso general del sistema, y además, particulares de cada estación.

Nuestro estudio está limitado al uso del sistema sin considerar posibles robos, roturas o el mantenimiento de las estaciones o los rodados. El alcance del modelo comprende a la totalidad del sistema, es decir, consideramos a las 72 estaciones de bicicletas que actualmente se encuentran operando.

Las suposiciones de las que nos valemos para el desarrollo del modelo son:

- En el inicio de la simulación se considera que no hay bicicletas en movimiento.
- En el caso que un usuario llegue a una estación para tomar servicio y la misma no tenga bicicletas disponibles, se considera que opta por un servicio motorizado, como lo es el colectivo urbano, ocasionando la emisión de CO₂, es decir, se considera como un **usuario perdido**.
- Los usuarios arriban a tomar servicio en cualquiera de las estaciones llegando 1 por hora.
- En el caso de llegar a la estación para dejar una bicicleta y la misma no tener anclajes disponibles, se supone que el cliente espera que se libere alguno, y ese tiempo se lo considera como **tiempo perdido**.
- Para calcular el CO₂ que se evitaría emitir al medio ambiente se calcula que, por km recorrido en bicicleta, **se ahorra 95 gramos de CO₂**. En caso de un cliente perdido, se considera que al no poder contar con el uso del sistema, esa persona **optó por un medio no sustentable**, por lo que se considera esa contaminación por la distancia que hubiera recorrido, disminuyendo así el CO₂ evitado.
- Se encuentran **72 estaciones y 625 bicicletas disponibles** en el modelo raíz.
- Los ciclistas se mueven con una velocidad con **distribución normal** con **media 13km/h**, **desvío de 5km/h** con una **mínima de 8km/h** y una **máxima de 22km/h**. Dentro de esta velocidad se consideran las frenadas en las esquinas, semáforos, tráfico, etc. Consideramos que se desplazan con esta velocidad durante toda la simulación, es decir, la velocidad no se ve afectada por horarios del día, clima (tormenta, lluvia), etc.

2.2. Generación del modelo de simulación base

Definido el sistema en términos conceptuales, procedimos a realizar un modelo de simulación base, que constaba en el funcionamiento del sistema con datos aleatorios. Llevamos las gráficas, datasets, parámetros, funciones y variables a la herramienta Anylogic, en la cual definimos las primeras interacciones entre los agentes. El modelo de simulación base consistía en un mapa en donde ubicamos las estaciones con sus respectivas latitudes y longitudes, a las cuales les aplicamos una lógica aleatoria de generación de ciclistas para que se muevan de una estación a otra.

2.3. Recolección y análisis de datos

Una vez obtenido un modelo base mayormente consistente, procedimos a determinar la información útil para definir el comportamiento de las variables y de los agentes del sistema. Como lo son, por ejemplo, las distribuciones de probabilidad de arribos de clientes a las estaciones.

Durante esta etapa se programaron rutinas en lenguaje Python que se encargan de tomar los datos del estado actual del sistema para inicializar la simulación con valores representativos de la realidad y poder

así evitar estados transitorios significativos. En concreto, se utilizó el servicio provisto en el sitio web del sistema **MiBiciTuBici** que, al consultarlo, arroja toda la información actualizada del estado del sistema en formato JSON. La respuesta del servicio es procesada por la rutina de Python que se encarga de:

1. transformar la respuesta en formato JSON a una tabla fácilmente interpretable
2. eliminar atributos innecesarios
3. calcular atributos derivados a partir de otros
4. exportar la tabla a un archivo .xlsx el cual es leído por Anylogic justo antes de cada simulación.

Los valores necesarios para inicializar la simulación son:

1. los atributos de cada estación: código identificador, nombre, dirección, latitud, longitud y la capacidad total de anclajes.
2. el estado actual de cada estación: la cantidad de anclajes disponibles y la cantidad de bicicletas disponibles.

2.4. Generación del modelo preliminar

En esta fase, investigamos de manera más profunda el comportamiento del sistema, agregando nuevas variables que podríamos considerar para el análisis, entre ellas las referentes al beneficio ecológico que supone el uso de este medio de transporte sustentable. El modelo preliminar obtenido se encontraba más cercano a la realidad que el modelo base.

Se adicionaron a este modelo:

1. la cantidad de clientes que se pierden en cada estación, es decir, aquellos clientes que llegan para tomar una bicicleta pero no existe ninguna disponible.
2. la cantidad de clientes que llegan a la estación para anclar una bicicleta pero se encuentran con que no hay anclajes disponibles.
3. el tiempo que estos clientes esperan hasta que se libera un anclaje
4. un dataset que almacena el histórico de los porcentajes de ocupación de las estaciones
5. ranking general con las estaciones con menos anclajes disponibles
6. ranking general con las estaciones con menos bicicletas disponibles
7. ranking general de las estaciones menos utilizadas
8. la utilización promedio del sistema
9. el volumen de CO2 evitado

2.5. Verificación del modelo

Al ejecutar el modelo preliminar verificamos su funcionamiento, corroborando el poder correr la simulación sin ningún error y que las variables se comporten de la manera esperada. En esta etapa detectamos ciertas inconsistencias y errores de modelado que se veían reflejadas al final de cada simulación como cantidades de bicicletas negativas, algo que físicamente es imposible. Tras analizar de manera detenida, notamos que la causa del error subyacía en el diagrama de flujo de procesos de las estaciones. Por esta razón, se realizó un rediseño del modelo que implicó también realizar ajustes en el diagrama de estados del agente bicicleta.

2.6. Validación del modelo

Completado el correcto funcionamiento del modelo y a lo largo de varias reuniones con nuestros stakeholders (profesores), fuimos comparándolo con el mundo real y así, realizando distintas mejoras al mismo a fin de asegurarnos de obtener una representación lo más fiel posible del sistema real.

2.7. Generación del modelo final

Tras la verificación y validación, se realizaron cambios estéticos en la interfaz gráfica del modelo con el objetivo de poder visualizar la evolución y los resultados de manera que resulte más sencilla de interpretar para los usuarios, arribando de esta forma al modelo final.

2.8. Determinación de los escenarios

Nos interesa evaluar mediante simulación cuál es la mejor manera de lograr la expansión del sistema en la zona céntrica de la ciudad, zona la cual se considera crítica por su volumen de operaciones durante días hábiles.

En base al objetivo, evaluamos dos alternativas de expansión:

1. incorporar una nueva estación en la zona céntrica, específicamente en la calle Mendoza altura 1750, entre las calles España e Italia, con 21 anclajes y 15 bicicletas nuevas.
2. aumentar la capacidad de las estaciones céntricas con código 01, 02, 10, 11, 12, 13 y 20, agregando 3 anclajes a cada una de ellas, incorporando un total de 21 anclajes y 15 bicicletas nuevas.

A partir del modelo raíz se derivaron dos modelos, cada uno correspondiente a una de las alternativas anteriormente mencionadas.

2.9. Análisis de sensibilidad

Nos interesa determinar de manera objetiva cuál de las dos alternativas resulta más conveniente. Teniendo en cuenta que un resultado de una simulación no es más que una realización de un conjunto de variables aleatorias, es preciso realizar varias réplicas con distintos valores semilla para el generador

aleatorio sobre cada uno de los escenarios bajo estudio. De esta forma, se obtiene una muestra con tamaño suficiente para realizar estimaciones confiables de las verdaderas características generales del sistema.

Sean las variables aleatorias X_1 y X_2 correspondientes al escenario 1 y 2 respectivamente, interesa evaluar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambas variables, para lo cual se realizará un test de medias.

Si denominamos con x_1^j con $j = 1, 2, \dots, n$ a la j -ésima muestra de la variable X_1 y con x_2^j a la j -ésima muestra de la variable X_2 , obtenidas a partir de ejecutar n réplicas de simulación de cada escenario, entonces resulta que

- el estadístico media muestral \bar{X}_1 es un estimador no sesgado de la media poblacional μ_{X_1} y el estadístico media muestral \bar{X}_2 es un estimador no sesgado de la media poblacional μ_{X_2} .
- el estadístico desvío muestral S_1 es un buen estimador del desvío poblacional σ_{X_1} y el estadístico desvío muestral S_2 es un buen estimador del desvío poblacional σ_{X_2} . En símbolos:

$$X_1 \sim N(\mu_{X_1}, \sigma_{X_1}); \quad X_2 \sim N(\mu_{X_2}, \sigma_{X_2})$$

$$\bar{X}_1 \sim N(\mu_{X_1}, \frac{\sigma_{X_1}}{\sqrt{n}})$$

$$\bar{X}_2 \sim N(\mu_{X_2}, \frac{\sigma_{X_2}}{\sqrt{n}})$$

donde

$$\bar{X}_i = \sum_{j=1}^n \frac{x_j^i}{n}$$

Si las X_i siguen distribuciones normales, entonces el estadístico \bar{X}_i también sigue una distribución normal por propiedad reproductiva de la distribución normal. Si las X_i no son normales, el *Teorema Central del Límite* expresa que \bar{X}_i se aproxima a una distribución normal con un n lo suficientemente grande.

Ahora, sea la variable aleatoria $Y = X_1 - X_2$, bajo el supuesto de que X_1 y X_2 están normalmente distribuidas con medias μ_1 y μ_2 y desvíos estándar σ_1 y σ_2 respectivamente, resulta que Y también está normalmente distribuida por ser una resta de variables aleatorias normalmente distribuidas. La media de esta nueva variable estará dada por $\mu_Y = \mu_1 - \mu_2$ y el desvío estándar será $\sigma_Y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. En símbolos,

$$Y \sim N(\mu_Y, \sigma_Y)$$

A partir de las realizaciones x_1^j y x_2^j con $j = 1, 2, \dots, n$ se derivan las realizaciones $y_j = x_1^j - x_2^j$, correspondientes a la variable Y .

Se construirá un intervalo de confianza del 95% para Y luego de haber realizado el muestreo aleatorio. Si el intervalo cubre al 0, no existe suficiente evidencia estadística para decir que los escenarios son significativamente diferentes. Dicho intervalo estará dado por la expresión

$$\bar{Y} \mp t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{S_Y}{\sqrt{n}}$$

donde:

- para un nivel de confianza del 95%, $\alpha = 0,05$ y

- el valor $t_{n-1;0,975}$ se escoge de la distribución t con $n - 1$ grados de libertad, donde n es el tamaño de muestra.
- $S_Y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{Y})^2}$

2.9.1. Selección del tamaño óptimo de muestra

Se desea hallar el número mínimo de corridas de simulación n que se deben realizar para garantizar una probabilidad del 95 % de que los intervalos de confianza que construyamos a partir de dicha muestra contengan al verdadero valor del parámetro. Particularmente nos interesa obtener el mínimo número de replicas que garantice dicha condición puesto que cada corrida de simulación supone un gran esfuerzo computacional.

El procedimiento consiste en:

1. escoger un valor aceptable d para la desviación estándar del estimador
2. generar al menos 100 valores
3. continuar generando valores adicionales hasta que se cumpla la desigualdad $S/\sqrt{k} < d$, donde k es el tamaño total de la muestra y S es la desviación estándar muestral basada en esos k valores.
4. estimar la media poblacional θ mediante el cálculo del estimador insesgado media muestral $\bar{X} = \sum_{i=1}^k X_i/k$.

2.10. Documentación del modelo, sugerencias y conclusiones

Por último, llevado a cabo todo el modelo con su análisis, realizamos toda la documentación correspondiente, desarrollada a continuación, en donde se definen todos los supuestos, alcance, variables, distribuciones de probabilidad establecidas, limitaciones y resultados para finalizar con las conclusiones de la simulación.

Es oportuno mencionar que el Modelo en AnyLogic, junto con sus sucesivas versiones durante el transcurso del corriente año, se encuentran detallados en el **repositorio de GitHub** de un integrante del grupo. Allí podrá encontrar los datos que fueron utilizados para localizar a las estaciones con sus respectivos atributos, datos de salidas (una vez finalizada la simulación), entre otros.

2.11. Modelo en AnyLogic

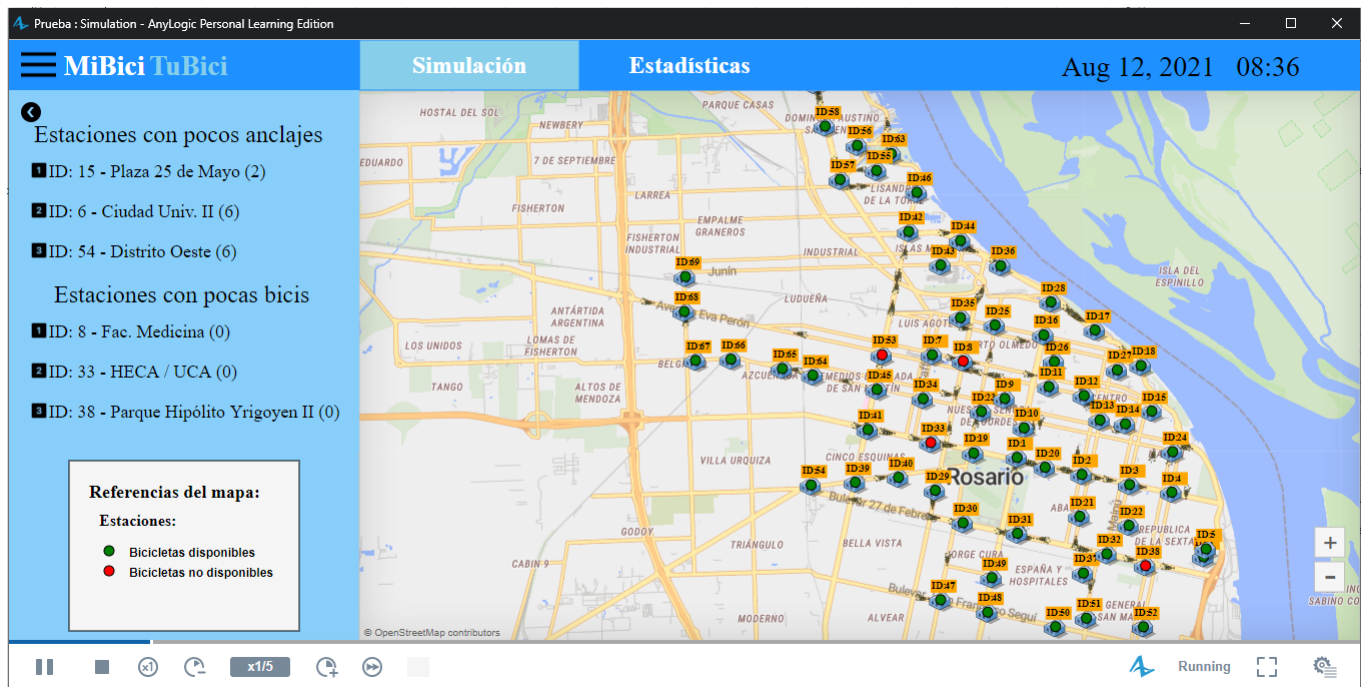


Figura 2.1: Vista del mapa del modelo de la simulación



Figura 2.2: Estadísticas generales de la simulación



Figura 2.3: Estadísticas de una de las estaciones del modelo

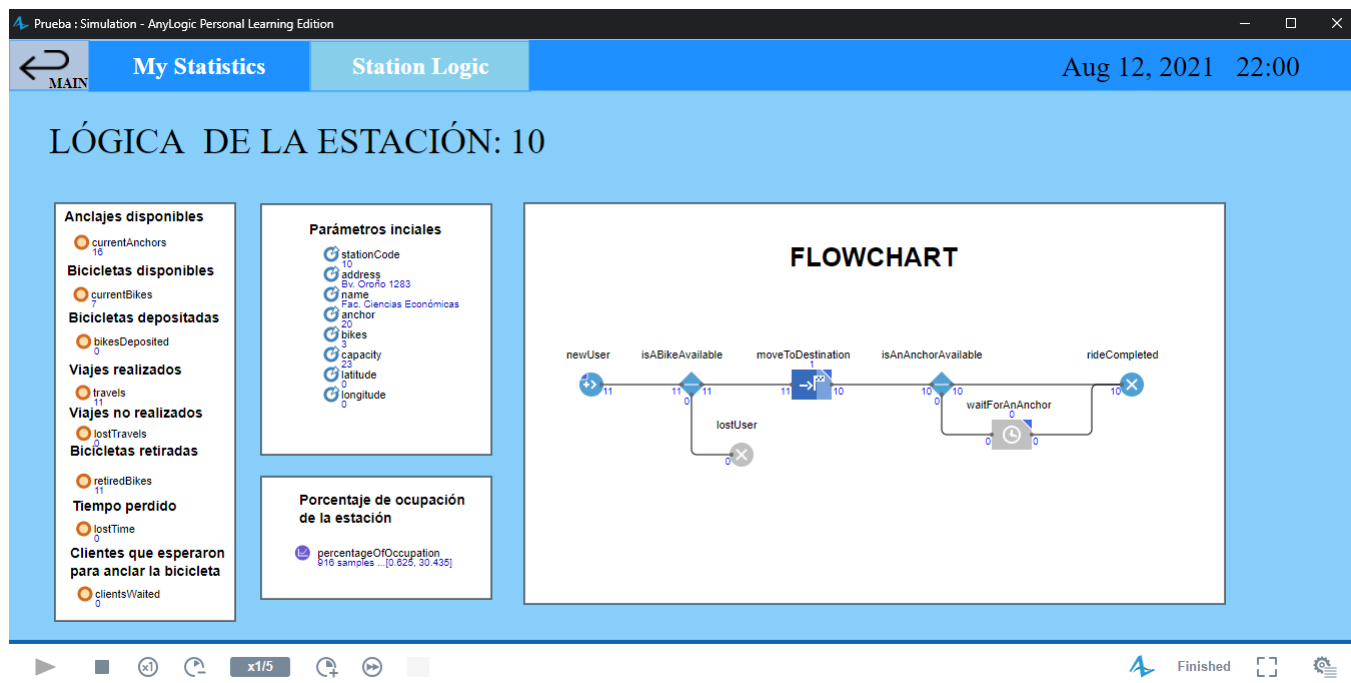


Figura 2.4: Lógica de cada estación del modelo

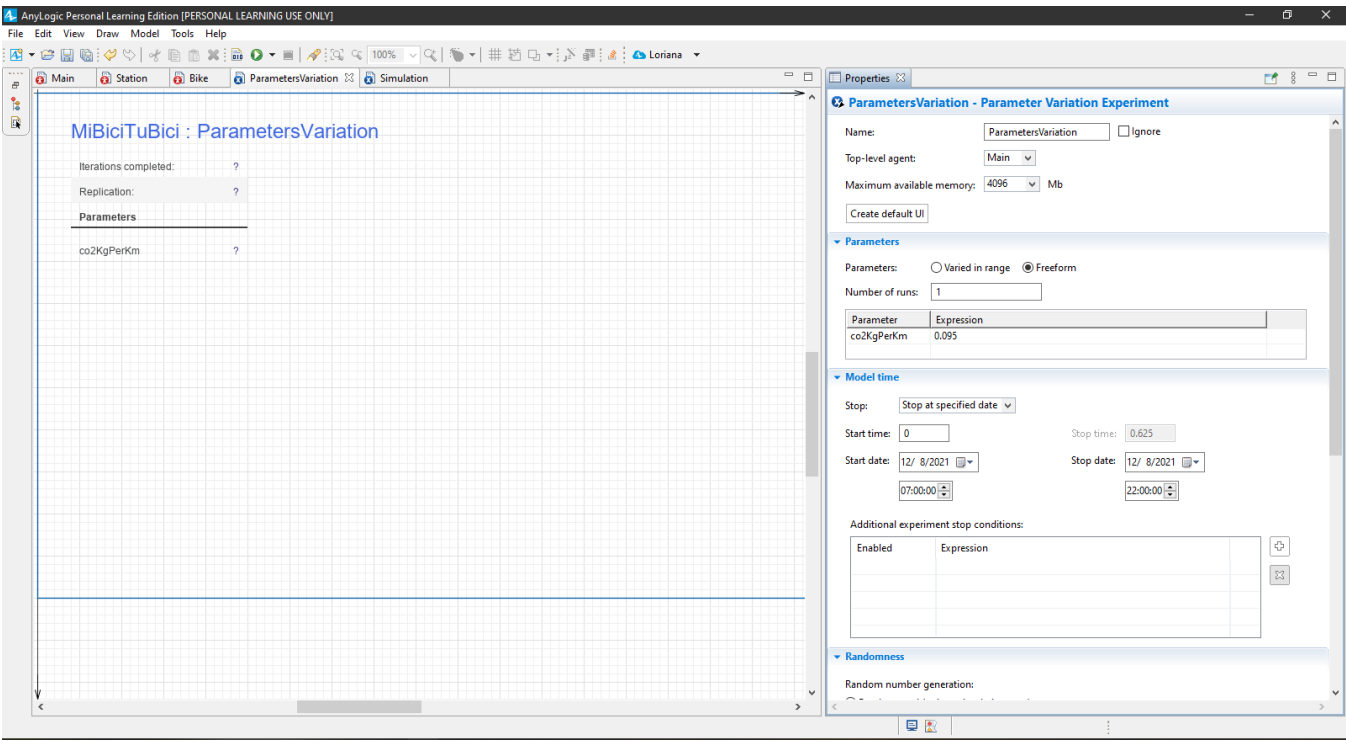


Figura 2.5: Parameters Variation

3. Análisis de Resultados

3.1. Comparación de los escenarios comparativos

A fin de poder realizar un estudio de los distintos escenarios planteados, se realizaron varias corridas de cada uno, y se formaron intervalos de confianza para los valores del CO₂ evitado para cada uno de ellos. A partir de los intervalos formados, realizamos una comparación de los mismos. El test de comparación empleado, llamado **test de medias**, consta de hacer las diferencias de cada uno de los valores obtenidos y construir un intervalo de confianza a partir de dichas diferencias. Las hipótesis de la prueba son:

H_0 : No existe diferencia significativa entre los escenarios. H_1 : Existe diferencia significativa entre los escenarios.

Si resulta que el intervalo de confianza se encuentra alejado del 0, entonces habríamos encontrado suficiente evidencia como para rechazar la hipótesis nula H_0 y aceptar la hipótesis alternativa H_1 . Si, aún habiendo garantizado una confianza del 95% con el número de réplicas seleccionado resulta que el intervalo contiene al 0, entonces no contamos con suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluimos que no existe diferencia entre los escenarios

Al momento de seleccionar el tamaño óptimo de la muestra se escogió un desvío aceptable $d = 1700$, por lo que para lograr un 95 % de confianza, se obtuvieron un total de 108 corridas para el caso del primer escenario, en donde variamos la cantidad de anclajes, y un total de 111 corridas para el otro caso en donde se agrega una nueva estación. Con este nivel de confianza garantizado, se realizaron 3 réplicas mas del primer escenario para poder así emparejarlas con las observaciones con las del segundo escenario y computar el intervalo de confianza sobre la totalidad de las mismas.

Los valores obtenidos fueron:

	Experimento 1	Experimento 2
Promedio muestral	244.670,12 kg	247.449,44 kg
Desvío muestral	16.535,31 kg	17.275,66 kg

Al realizar el test de las medias de acuerdo al procedimiento desarrollado en el apartado *Análisis de sensibilidad* se obtuvieron los siguientes resultados:

Primer cuartil: -7743.42 kg.

Segundo cuartil: -3285.84 kg.

Tercer cuartil: 1171.73 kg.

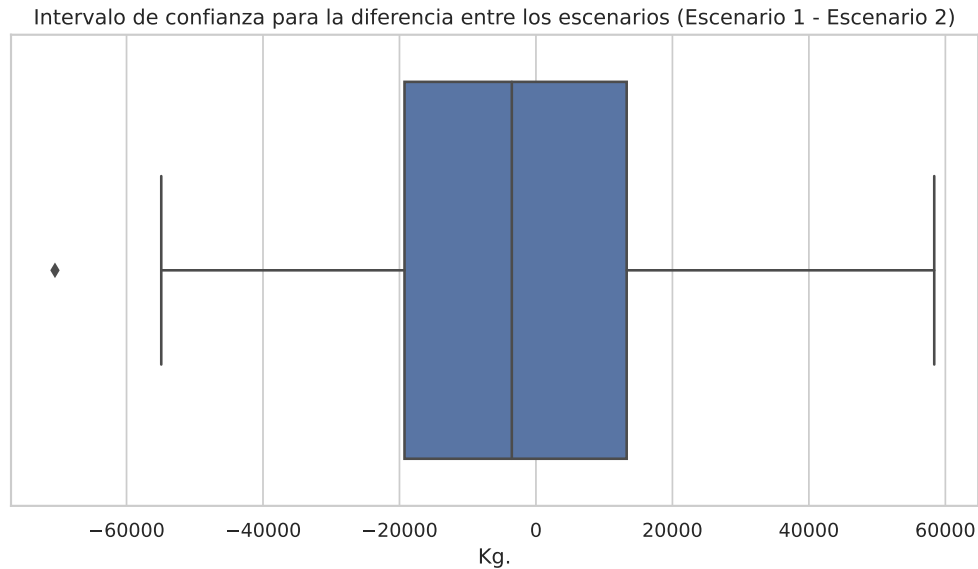


Figura 3.1: Intervalo de confianza 95 % para la diferencia entre los escenarios (escenario 1 - escenario 2).

Dado que el intervalo contiene al 0, concluimos que no contamos con suficiente evidencia como para decir que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los escenarios bajo estudio.

4. Conclusiones

4.1. Conclusión General

El motivo de origen de este trabajo surgió debido a la actual expansión del Sistema Mi Bici Tu Bici. A lo largo del trabajo se buscó evaluar el impacto de su expansión de diferentes formas, ya sea ampliando la capacidad de las estaciones existentes o bien agregando una nueva, para luego relacionarlo con un aspecto ambiental como lo es el CO₂ que se logra evitar.

Para ello, primeramente hicimos un enfoque en el funcionamiento del sistema, y luego una investigación de cómo se contaminaría en caso de la no existencia del mismo, asumiendo que en su lugar los usuarios optarían por otros medios de movilidad no sustentables como son los automóviles o los colectivos.

Cabe recordar que, dado la falta de datos reales, nos tenemos que valer de diversas suposiciones en cuanto a datos que son de suma importancia para evaluar el objetivo de la simulación, tales como, fecha y hora de salida/ llegada de/ a la estación de cada usuario, cómo son distribuidas las bicicletas en aquellas estaciones que se quedan con muy pocas bicicletas, entre otras.

Esto nos lleva, no sólo a realizar estudios de simulación sobre un modelo de baja confiabilidad sino también al acarreo de estos datos ficticios a lo largo y ancho de la realización de este trabajo, por lo tanto obtenemos conclusiones alejadas de la realidad.

Como objetivo principal se planteó mejorar el sistema actual de tal forma de ampliar la capacidad de algunas estaciones o de agregar una nueva en la zona del Centro de la ciudad de Rosario, para ello tuvimos en consideración cómo será el impacto al medio ambiente en cada uno de los escenarios. Evaluamos entonces, la cantidad de dióxido de carbono ahorrado que se tendría en cada uno de los escenarios y optaríamos por aquella que supone una mayor cantidad de CO₂ ahorrado.

A partir de los resultados obtenidos por el Test de Medias, no contamos con evidencia estadística para concluir que los diferentes escenarios considerados son estadísticamente diferentes, ya que dentro del intervalo obtenido está contenido el cero. Por lo tanto, al momento de realizar la selección del mejor escenario podemos optar por analizar otras variables que podrían mejorar el sistema. De las cuales pueden ser, el tiempo de espera por un anclaje libre al llegar a la estación de destino, de cada uno de los usuarios; la cantidad total de viajes perdidos (esto es cuando el usuario llega a una estación, en búsqueda de una bicicleta, y la misma está vacía). En ambos casos la idea será entonces, minimizar, a medida de lo posible, estas variables. Esto incurrirá en un análisis detallado, realizando el test que se nombró anteriormente para dar respuesta a qué conviene más.

Por consiguiente, dado que ambas alternativas no nos demuestran una diferencia significativa en el nivel de CO₂ evitado, podríamos optar por elegir la opción más económica. Para ello, habría que realizar un estudio de los costos que incurren en las diferentes alternativas y optar por la que suponga menores costos.

En este trabajo se quiere hacer tomar conciencia del impacto ambiental que se evita al utilizar medios sustentables para así promover el uso del mismo. El uso de los medios sustentables, como lo es la bicicleta, no solo mejora los problemas del calentamiento global y el cambio climático actual, sino que también reduce el ruido ambiental, mejora la calidad de vida de las personas, como lo es la salud mental y física, reduce el tráfico, por lo que da una mejor circulación.

Otro aspecto a destacar es el potencial análisis que se obtiene por medio de la simulación. A lo largo del trabajo, pudimos hacer un análisis del sistema existente en funcionamiento variando sus variables, como lo son sus estaciones o anclajes, sin tener que modificar el sistema actual lo que conllevaría grandes costos.

5. Bibliografía

- Simulation, Ross - 5th Edition.
- Simulation Modeling Analysis, Law Kelton.
- Sitio oficial *MiBiciTuBici*
- Documentación oficial de la herramienta Anylogic.
- *Plan Local de Acción Climática Rosario 2030*