



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA

## Sistemas de Tiempo Real

### Informe Final

# **SIMULACIÓN DE LA ESTACIÓN BERAZATEGUI**

Alumnos:

CALDERÓN Sergio, BLANCO Valentín, BONIFACIO Lucas

14 de diciembre de 2022

# Índice

Resumen .....	1
Palabras clave .....	1
Introducción.....	1
Modelo de agentes .....	2
Agente tren .....	2
Agente pasajero .....	2
Estadísticas .....	4
Herramienta de simulación.....	5
Desarrollo de simulación .....	5
Modelización .....	5
Entorno .....	6
Entradas .....	7
Salidas.....	7
Ejecución de simulación .....	8
Conclusiones.....	10
Código fuente .....	10
Bibliografía.....	10

## Resumen

El transporte público en Argentina es utilizado a diario por una parte considerable de la población, en especial en el Área Metropolitana de Buenos Aires. La línea Roca conecta la Capital Federal, en la estación Plaza Constitución, con las localidades del sur del Gran Buenos Aires y La Plata. En este proyecto, se estudia el caso de la estación Berazategui, transitada frecuentemente por quienes realizan trasbordos entre los ramales de Bosques y La Plata. Se realiza la simulación para poder contabilizar la cantidad de pasajeros que se encuentran en cada andén según la franja horaria, como así también la utilización del puente peatonal, evaluando si la estación satura para ciertas condiciones.

## Palabras clave

Estación de trenes, simulación 2D, tiempo real, transporte público en Argentina.

## Introducción

En los últimos años, la utilización de los trenes metropolitanos ha seguido una tendencia creciente. Según datos del Ministerio de Transporte, la línea Roca incrementó en un 56% su cantidad diaria de pasajeros entre el año 2015 y 2019, pasando de 340.000 pasajeros por día hábil a 530.000. La estación Berazategui tuvo un impacto directo luego de la reactivación del “Vía Circuito”, tramo que conecta la misma con Bosques.

La estación en estudio posee 2 andenes en uso, y un puente peatonal que conecta los mismos. Para realizar un trasbordo, los pasajeros siempre deben bajarse del tren, cruzar el puente y esperar en el andén contrario. Esto representa un problema cuando los trenes arriban con poca diferencia de tiempo, ya que los pasajeros se apresuran a cruzar el puente para no perder el tren a tomar, y en varias ocasiones éste abandona la estación rápidamente, provocando que los pasajeros deban esperar por el siguiente servicio.

El objetivo del presente proyecto es diseñar una simulación que pueda representar de manera fiel a la estación Berazategui, ajustándose a los datos de cantidad de pasajeros mensuales, frecuencia de trenes y horarios de operación, proporcionados por el Ministerio de Transporte. Se hace énfasis en proporcionar múltiples opciones de configuración para variar dichos parámetros, de modo que se pueda adaptar el proyecto a más estaciones.

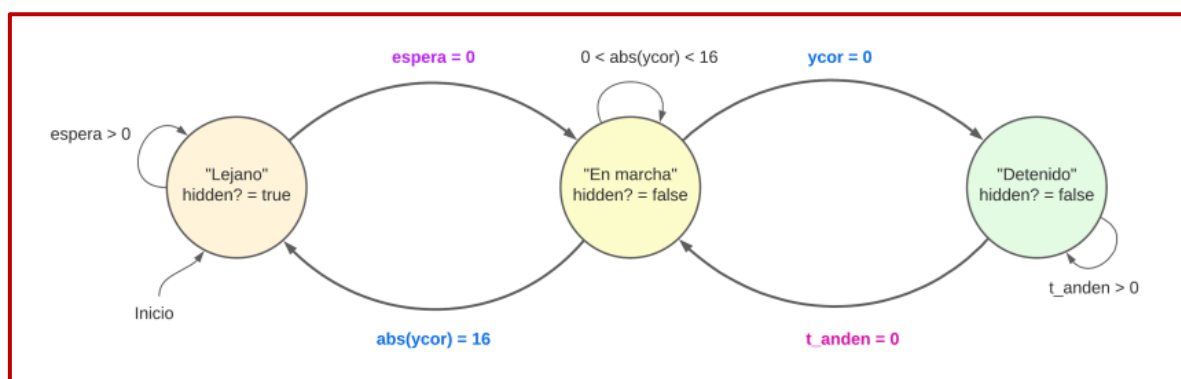
## Modelo de agentes

### Agente tren

El tren se modeló mediante una máquina de estados de Moore con 3 estados:

- **Lejano:** es el estado inicial, con visibilidad oculta, fuera de la estación.
- **En marcha:** el tren se encuentra en movimiento, con velocidad en función de la coordenada “y”. De este modo, acelera o desacelera para alejarse o acercarse.
- **Detenido:** el tren arribó al andén y se espera primero a que desciendan los pasajeros para luego esperar un tiempo de tolerancia de subida de pasajeros.

Como entradas se pueden indicar dos: **espera**, que indica el tiempo restante para que llegue el tren a la estación; y **t\_anden**, que es el tiempo restante de tolerancia. El diagrama de estados y la tabla que explica lo anterior se muestran a continuación.



**Fig. 1.** Diagrama de estados del agente tren.

ESTADO ACTUAL	ENTRADAS POS	ENTRADAS ATRIBUTOS			ENTRADAS GLOBALES		ESTADO SIGUIENTE	ACCION
	ycor	t_anden	espera	who	pasajeros rest_izquierda	pasajeros rest_derecha		
YENDO	$abs() < 0.01$	X	X	X	X	X	EN ANDEN	Espera tiempo en anden
	$abs(ycor) \geq \max\_pycor$	X	X	X	X	X	LEJANO	$hidden? = true$ hasta próx. arribo
EN ANDÉN	X	X	X	0	0	X	EN ANDEN	Decrementar t_anden
	X	X	X	1	X	0	EN ANDEN	Decrementar t_anden
	X	0	X	X	X	X	YENDO	Empieza a avanzar
LEJANO	X	X	0	X	X	X	YENDO	Aparece en la estación del lado adecuado

**Fig. 2.** Tabla de estados del agente tren.

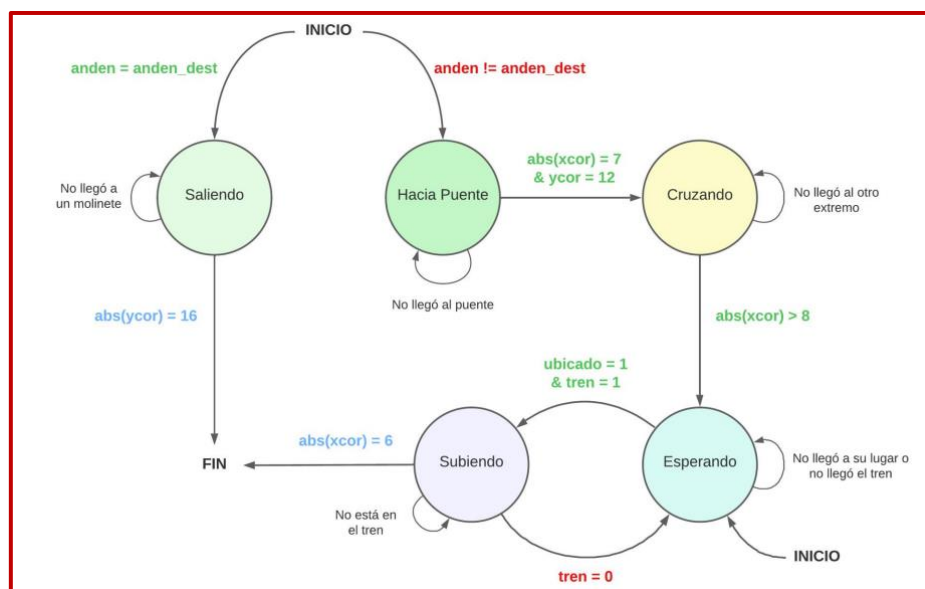
### Agente pasajero

El pasajero se modeló a partir de una máquina de estados de Moore, donde se cuenta con 5 estados. Se tienen varios posibles puntos de entrada, ya que un pasajero puede ser generado desde un tren para salir o hacer trasbordo, o bien desde un molinete para esperar en el mismo andén o en el andén contrario. Los estados definidos son:

## SIMULACIÓN DE ESTACIÓN BERAZATEGUI

- **Saliendo:** un pasajero que descendió de un tren debe salir de la estación.
- **Hacia puente:** el pasajero debe tomar el tren en el andén opuesto al que se encuentra, por lo que debe dirigirse hacia la escalera del puente peatonal.
- **Cruzando:** el pasajero está en el puente avanzando hacia el andén destino.
- **Esperando:** el pasajero está en el andén correcto esperando la llegada del tren.
- **Subiendo:** el pasajero está en el andén correcto y el tren se encuentra detenido en dicho andén, primero espera a que desciendan los pasajeros y luego se acerca.

Respecto a las entradas, son: **andén**, que es el valor del atributo homónimo de la celda donde está el pasajero; **xcor** e **ycor**, que son las coordenadas propias del pasajero; **tren**, que indica si el tren se encuentra detenido en el andén (consultando a dicho agente); y **ubicado**, que indica si el pasajero se encuentra en su lugar de espera reservado.



**Fig. 3.** Diagrama de estados del agente pasajero.

ESTADO ACTUAL	ENTRADAS POSICIÓN		ENTRADAS GLOBALES		ESTADO SIGUIENTE	ACCION
	x_esperada	y_esperada	tren?	faltan_bajar?		
SALIENDO	0	(x)	(x)	(x)	Saliendo	Acercarse horizontalmente
	1	0	(x)	(x)	Saliendo	Avanzar hacia molinete
	1	1	(x)	(x)	-	die
HACIA PUENTE	0	(x)	(x)	(x)	Hacia Puente	Acercarse horizontalmente
	1	0	(x)	(x)	Hacia Puente	Avanzar hacia escalera
	1	1	(x)	(x)	Cruzando	Girar hacia andén destino
CRUZANDO	0	(x)	(x)	(x)	Cruzando	Seguir avanzando
	1	(x)	(x)	(x)	Esperando	Girar hacia el sur
ESPERANDO	0	(x)	(x)	(x)	Esperando	Acercarse horizontalmente
	1	0	(x)	(x)	Esperando	Avanzar hacia lugar de espera
	1	1	0	(x)	Esperando	-
	1	1	1	(x)	Subiendo	Girar hacia el tren
SUBIENDO	0	(x)	0	(x)	Esperando	Girar hacia lugar de espera
	0	(x)	1	0	Subiendo	Acercarse al tren
	0	(x)	1	1	Subiendo	-
	1	(x)	(x)	(x)	-	die

**Fig. 4.** Tabla de estados de agente pasajero.

## Estadísticas

Se poseen los datos anuales de la cantidad boletos vendidos por estación. Se eligió el año 2019 como referencia ya que fue el año anterior al comienzo de la pandemia por COVID-19 en Argentina. Se conoce la cantidad de boletos vendidos en cada mes, cuyos valores oscilan entre 197.322 para el mes de julio, y 331.335 para el mes de octubre. La cantidad diaria de pasajeros se puede calcular como la cifra mensual dividido por 30.

Los trenes prestan servicio desde las 5 AM hasta las 10 PM. La frecuencia del servicio cambia según la franja horaria: hasta las 12 PM son cada 12 minutos, entre las 12 PM y 5 PM son cada 15 minutos, entre las 5 PM y 9 PM son cada 12 minutos, y finalmente entre las 9 PM y 10 PM son cada 15 minutos. Resulta entonces un total de 80 trenes por cada andén durante un día. Se puede estimar que el mayor porcentaje de los pasajeros se moviliza en las horas pico, es decir, cuando la frecuencia es 12 minutos.

$$\frac{\text{Pasajeros}}{\text{tren}} = \frac{\text{Pasajeros}}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{2 \text{ andenes} * 80 \text{ trenes/anden}}$$

$$\frac{\text{Pasajeros}}{\text{tren}} = \frac{\text{Pasajeros por mes}}{4800 \text{ trenes por mes}}$$

Si se considera que un 50% de los pasajeros sube al tren y la otra mitad baja del tren, se tiene como primera aproximación que la cantidad de pasajeros que bajan del tren es la cantidad mensual dividido por 9600, para conocer cuántos deben generarse.

Sin embargo, esto no considera que la mayor movilidad se da en horas pico. Para ello, se calculó el porcentaje que representa la cantidad de trenes de frecuencia 12 minutos respecto al total diario. Resulta que 55 de 80 trenes circulan en hora pico, un 68.75%.

A falta de información, suponemos que en hora pico viaja el doble de pasajeros que en hora no pico, entonces un 81.48% del total diario viaja en alguno de los trenes de frecuencia 12 minutos, y el 18.52% restante en algún tren de frecuencia 15 minutos.

```
let hora_pico (hora_actual < 12 or (hora_actual >= 17 and hora_actual < 21))
ifelse (hora_pico)
[set cant_bajan round(total * 0.8 / (30 * 110 * 2))]
[set cant_bajan round(total * 0.2 / (30 * 50 * 2))]
```

Fig. 5. Fragmento de código que establece la cantidad de pasajeros que bajan de un tren.

## **Herramienta de simulación**

Se utiliza la herramienta NetLogo, una de las tres opciones recomendadas por la cátedra. Es un entorno de modelado programable en el que se pueden insertar múltiples agentes de distinto tipo. Todos estos agentes se pueden controlar de manera individual o bajo llamados grupales, lo que resulta muy conveniente para ejecutar distintas acciones según el estado en que se encuentre cada uno. El agente base es “turtle”, a partir del cual se pueden crear tipos de agentes con atributos y apariencia personalizada.

Otro de los motivos por el que se eligió NetLogo para el desarrollo de la simulación es su simple interfaz de usuario y la baja extensión de código necesario para realizar movimientos, giros y consultas de variables en comparación a otros lenguajes.

En cuanto a las versiones disponibles, 2D y 3D, se decidió utilizar la primera debido a que los resultados numéricos de la ejecución de la simulación en tiempo y forma prevalecen sobre la apariencia visual de la estación. Modelar el puente en 3D implicaría un mayor cómputo que no tiene mejoras realistas en la precisión de resultados.

## **Desarrollo de simulación**

### **Modelización**

Tomando el peor caso, en el mes de octubre, de un tren pueden bajar hasta 38 pasajeros en hora pico, lo cual no es un número elevado. Entonces se decidió representar a cada pasajero del mundo real con 1 agente de dicho tipo, relación 1:1. En el caso de la estación Berazategui, este número resulta acorde, sin exigir demasiado a la CPU.

Respecto a la base de tiempo, se utilizaron 100 ticks por cada minuto real, lo que implica que una hora real sea representada por 6000 ticks. La duración total de la simulación de un día operativo será de  $(22 - 5) \times 6000 \text{ ticks} = 102.000 \text{ ticks}$ .

Al haber 3 estados de trenes y 5 estados de pasajeros, se actualizan los agentes según su estado cada 8 ticks, evitando una sobrecarga de tarea por tick, pero con el costo de reducir un poco la fluidez de la simulación, al realizar desplazamientos más grandes.

## Entorno

La estación se modeló a partir de agentes estacionarios de nombre *patches* que representan cada celda en el mapa. A dichas entidades se asignaron varios atributos y colores: las vías se representaron con elevación tipo 0, los andenes con elevación 1 y color en escalas de grises aleatorias, y el puente con elevación 2 y color rojo.

También se definió un atributo *andén* a cada celda para indicar la zona del mapa correspondiente. Se definió andén 0 y 1 correspondiendo al andén izquierdo y derecho, respectivamente. Se incluyó además otro atributo numérico, *lugar de espera*, donde el 0 corresponde a que en dicha celda no se puede esperar (caso vías) y 1 a que sí se puede (andenes). Por último, para administrar las celdas de manera concurrente se agregó un atributo *libre*, que permite consultar si ya se encuentra reservada por algún pasajero.

Respecto a las dimensiones, el mapa es un cuadrado de 16x16 celdas, donde las zonas identificables varían en “x” respecto al origen o centro. En específico, las vías se encuentran en el rango  $x = (-6, 6)$ , el andén izquierdo en  $x = (-16, -6)$ , el andén derecho en  $x = (6, 16)$ , y por último el puente en  $x = (-7, 7)$ . La coordenada “y” se utiliza para determinar la ubicación de los molinetes o salidas de la estación, en los extremos, y también el puente en el rango  $y = (10, 12)$ , desplazado del centro del mapa.

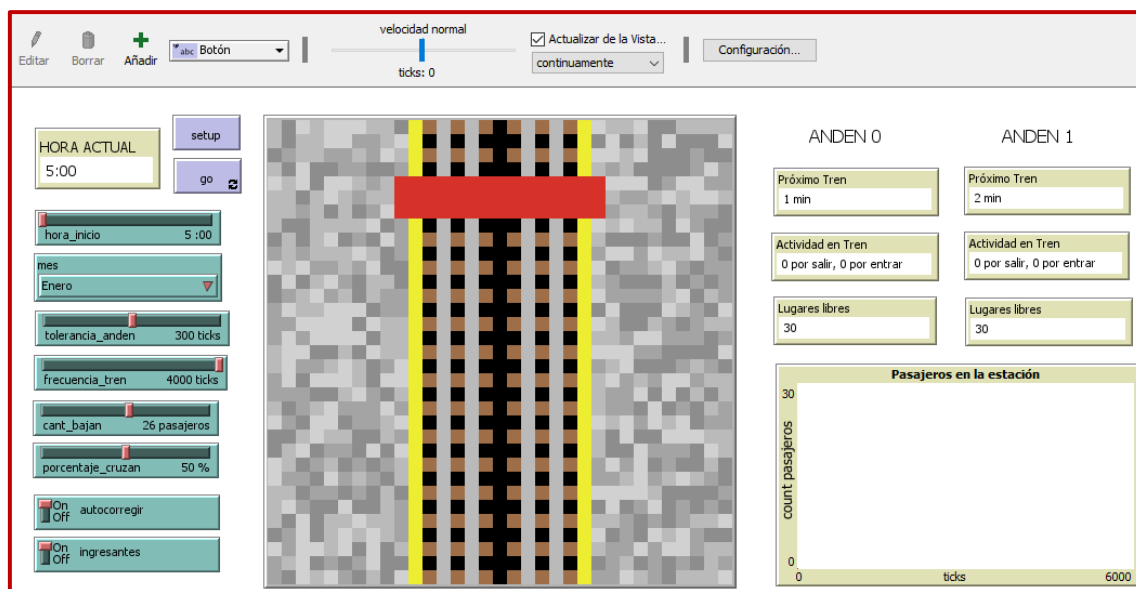


Fig. 6. Entorno desarrollado en NetLogo para la simulación.



## Entradas

Al momento de configurar la simulación, se pueden configurar las variables descritas a continuación. También se disponen 2 interruptores para activar o desactivar la generación de pasajeros *ingresantes* desde molinetes y la *autocorrección* de parámetros.

- ☐ La variable *hora\_inicio*, para comenzar la simulación desde la hora seleccionada.
- ☐ La variable *mes*, mediante un selector con los nombres de los 12 meses del año, que determinará la cantidad de pasajeros que bajarán de cada tren.
- ☐ La variable *tolerancia\_anden*, que representa la cantidad de tiempo en ticks que el tren esperará en la estación una vez que terminen de descender sus pasajeros.
- ☐ La variable *frecuencia\_tren*, que indica la cantidad de ticks que deben transcurrir para la llegada del próximo tren a un andén. Si la autocorrección está activada, la frecuencia cambiará automáticamente al entrar a una nueva franja horaria.
- ☐ La variable *cant\_bajan*, que indica explícitamente la cantidad de pasajeros que descenderán en el próximo tren que arribe a la estación. Si la autocorrección está activada, el número cambiará automáticamente al entrar en hora pico o no pico.
- ☐ La variable *porcentaje\_cruzan*, que establece el porcentaje de los pasajeros que realizarán un trasbordo. Esto aplica a los pasajeros que descienden de los trenes que arriban al andén izquierdo, que pueden optar por dirigirse directamente hacia un molinete para salir, o bien cruzar el puente hacia el andén contrario.

## Salidas

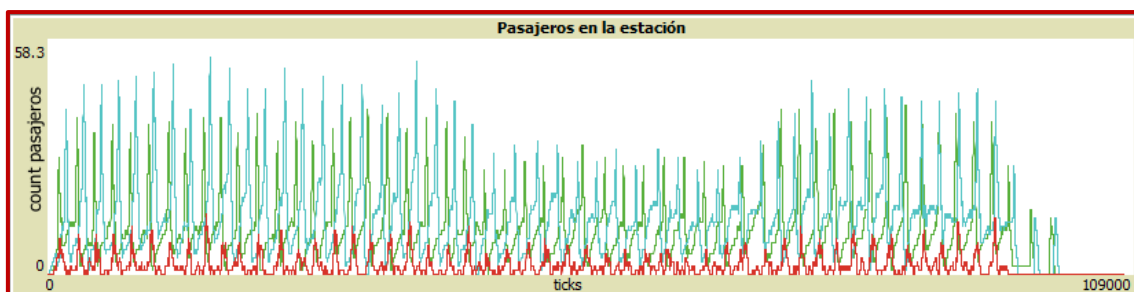
En la interfaz de usuario se presentan varios monitores que muestran el valor de una variable y la combinación de éstas con textos auxiliares, que se listan a continuación.

- ☐ La hora y minuto actual, calculado a partir de los ticks y la hora de inicio.
- ☐ El tiempo de llegada del próximo tren, expresado en minutos, para cada andén.
- ☐ La actividad en cada tren, indicando la cantidad de pasajeros pendientes por generarse (bajar) del tren detenido y la cantidad que espera a subir al tren.
- ☐ La cantidad de lugares libres, calculado a partir del conteo de celdas con el atributo “lugar de espera” en 1 y el atributo “libre” en verdadero, en cada andén.

También se dispone de un gráfico de la cantidad de pasajeros en función del tiempo, expresado en ticks, diferenciado por colores para cada andén y el puente.

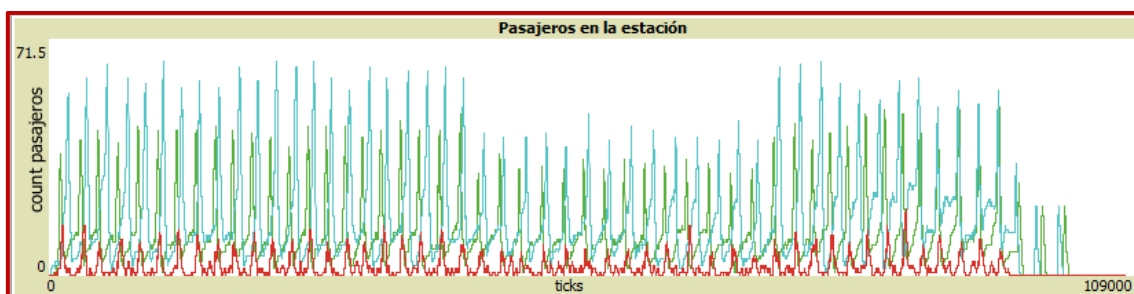
## Ejecución de simulación

Estableciendo la configuración por defecto, con autocorrección activada, se consigue ejecutar una simulación fiel a la realidad, donde la mayor concentración de pasajeros en los andenes se da en las horas pico, con máximos en los arribos de tren.



**Fig. 7.** Resultados luego de la ejecución por defecto para el mes de enero.

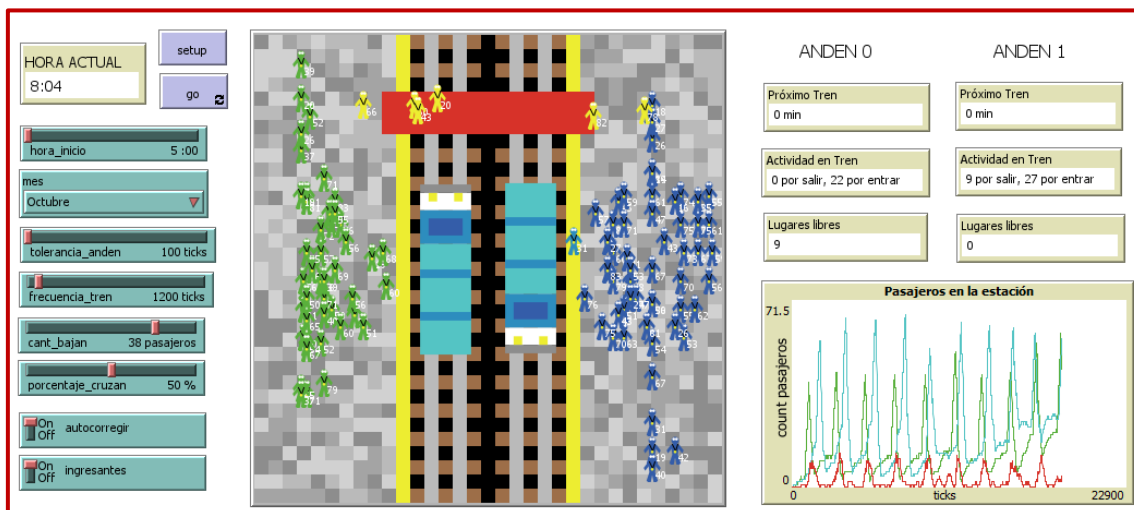
En el gráfico de salida de la figura 7 se puede observar que existen 4 intervalos bien definidos de comportamiento según la franja horaria. Entre el tick 0 y 41.100, que representa el rango 5:00 a 11:50 AM, se alcanza un máximo de 55 pasajeros cuando llega un tren al andén. El andén derecho, representado en color azul, es 35% más concurrido que el izquierdo (máximo de 40 pasajeros), representado en color verde, ya que los pasajeros que realizan trasbordos deben esperar del lado derecho. Luego, se produce una menor demanda hasta el tick 70.000 (hora 4:40 PM), y se repite el caso de la mañana hasta el tick 95.000 (hora 8:50 PM), para finalizar decrementándose hasta las 10 PM.



**Fig. 8.** Resultados luego de la ejecución por defecto para el mes de octubre.

Repitiendo la ejecución para el mes más concurrido, se observa en la figura 8 que se alcanzan nuevos picos máximos de hasta 65 pasajeros en el andén derecho. Dada la aleatoriedad impuesta a la frecuencia de tren, de hasta 3 minutos de atraso y 1 minuto de adelantamiento, ocurren situaciones de llegadas en simultáneo de trenes en ambos andenes, expresado como máximos compartidos por los trazos verde y azul.

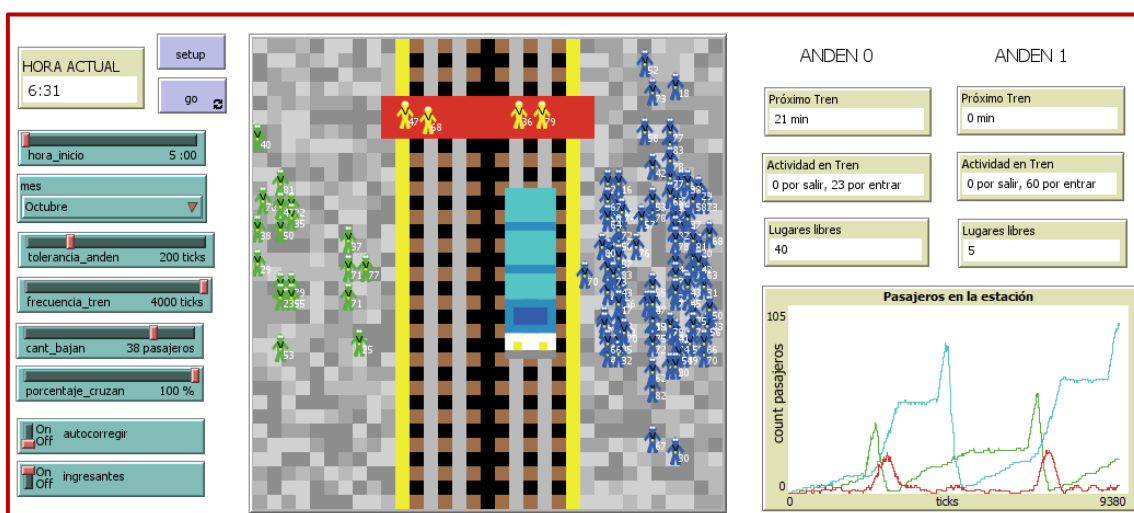
## SIMULACIÓN DE ESTACIÓN BERAZATEGUI



**Fig. 9.** Dos trenes llegando a la estación con poca diferencia de tiempo.

Los pasajeros que se encuentren cruzando el puente mientras el tren está esperando para continuar con su recorrido, probablemente se quedarán esperando en el andén al próximo servicio. Esto se puede observar en la figura 9, donde luego de un máximo local, el trazo azul no disminuye por debajo de los 15 pasajeros. Si se disminuye considerablemente la tolerancia de andén (1 minuto), la estación comienza a saturar.

Respecto al puente, en todos los casos se observa que su mayor utilización ocurre en el lapso intermedio entre dos trenes de andenes contrarios que arriban próximo, en la mayoría de veces luego de la llegada del tren izquierdo por los trasbordos.



**Fig. 10.** Arribo del tren derecho con poca frecuencia y muchos trasbordos.

En un caso extremo de reducir la frecuencia hasta 40 minutos, y la cantidad de trasbordos al máximo, es difícil que dos trenes arriben en simultáneo. Aun así, hay más de 100 pasajeros en el andén derecho, quedando desbalanceado respecto al izquierdo.

### Conclusiones

Para finalizar, se puede deducir que este modelo de esta estación es adaptable a muchas otras y no necesariamente de Argentina. Por la mayoría de estaciones, que no sean cabeceras, suelen circular trenes hacia dos direcciones, por lo que también se tienen 2 andenes y una forma de cruzar, como un puente o un túnel subterráneo.

Los parámetros de tiempo, como la frecuencia y las franjas de hora pico se pueden modificar para adecuarlo a otros ramales. La cantidad de pasajeros diarios se puede corregir de manera sencilla cambiando los 12 números en la función correspondiente.

En el caso de estaciones donde no se realicen trasbordos, se adapta perfectamente con solo establecer el porcentaje de pasajeros que cruzan a 0%, ya que esta configuración no afecta a los pasajeros generados desde los molinetes del andén opuesto.

### Código fuente

Se adjunta un enlace al código fuente del proyecto, que consta de un único archivo:  
<https://drive.google.com/drive/folders/1AH167CMaq9z1sV87871JntSPBcWsfJx1>

### Bibliografía

- Ministerio de Transporte (20 de marzo de 2019). *En los trenes metropolitanos viaja medio millón de personas más por día que hace 4 años*. Disponible en Internet en: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/en-los-trenes-metropolitanos-viaja-medio-millon-de-personas-mas-por-dia-que-hace-4-anos>
- Ministerio de Transporte (2022). *Horarios actualizados de la Línea Roca*. Disponible en Internet en: <https://www.trenroca.com.ar/img/pdf/Horarios-Trenes-Constitucion-La-Plata.pdf>
- Ministerio de Transporte. *Boletos vendidos por estación*. Disponible en Internet en: <https://www.argentina.gob.ar/transporte/cnrt/estadisticas-ferroviarias>
- Uri Wilensky (29 de septiembre de 2022). *NetLogo User Manual version 6.3.0*. Disponible en Internet en: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>