

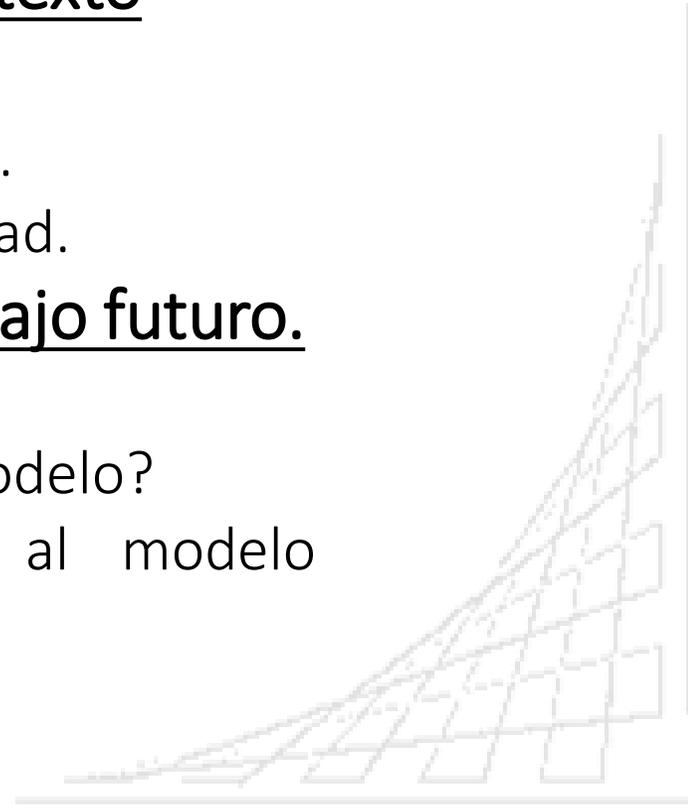
Planeación táctica y asignación de vehículos en un sistema de transporte masivo mediante el uso de modelos de programación entera mixta y métodos heurísticos.

Tactical planning and vehicle allocation in a mass transit system using mixed integer programming models and heuristic methods.

**SANTIAGO ANDRES DIAZ VILLAMIL**  
**ANGÉLICA SARMIENTO LEPESQUEUR**



1. Contexto del problema.
2. Revisión de la literatura.
3. Método aplicado.
  - 3.1. Diseño de rutas.
    - 3.1.1. Problema generalizado.
    - 3.1.2. Costos considerados.
    - 3.1.3. Supuestos y entradas del modelo.
  - 3.2. Asignación de frecuencias.
    - 3.2.1. Problema generalizado.
    - 3.2.2. Costos considerados.
    - 3.2.3. Diagrama de flujo del modelo.
    - 3.2.4. Supuestos y entradas del modelo.
4. Resultados al aplicar el modelo en un contexto ficticio.
  - 4.1. Entradas del modelo.
  - 4.2. Análisis de sensibilidad.
5. Conclusiones y trabajo futuro.
  - 5.1. Conclusiones
  - 5.2. ¿Dónde aplicar el modelo?
  - 5.3. Posibles mejoras al modelo actual.



# CONTEXTO DEL PROBLEMA

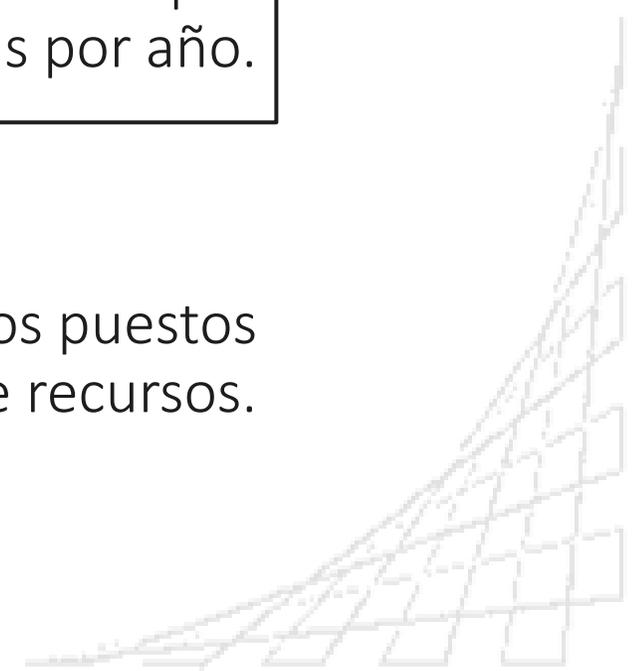
- En Bogotá, 65% de los usuarios del servicio de transporte público gastan más de dos horas diarias en desplazamientos.



- Más del 65% de los usuarios del transporte público en Bogotá esperan más de 20 minutos por su transporte.

Casi dos días enteros por mes o 10 días por año.

- La existencia de los puestos vacíos es un gasto de recursos.



# CONTEXTO DEL PROBLEMA

- En 2018 se esperaba tener 274.000 usuarios de terminales de transporte viajando para Navidad solamente en Bogotá, de acuerdo con “La terminal” (empresa que maneja este servicio).



## DEMANDA DETERMINÍSTICA

- Applying Integer Linear Programming to the Fleet Assignment Problem.

**Jeph Abara.**

- Taxi and Ride Sharing: A Dynamic Dial-a-Ride Problem with Money as an Incentive.

**Douglas O. Santos, Eduardo C. Xavier**

- Modelación matemática y técnicas cuantitativas en un procedimiento para la organización y racionalidad del transporte.

**Dr.C. Armando Manuel Boullosa Torrecilla MSc.**

**Juan Carlos Lage Jiménez MSc. Edilio Caridad**

**Gil Mursulí**

- Multiple criteria optimization method for the vehicle assignment problem in a bus transportation company

**Jacek Żak, Andrzej Jaszkwicz, Adam Redmer**



**LP**

**VAP+ $\bar{X}$**

## DEMANDA ESTOCÁSTICA

- Analyse und Optimierung von öffentlichen Straßenverkehrsnetzen auf Basis einer objektorientierten, logistischen Betrachtungsweise

**Dipl.-Wirtsch**

**Ing. György Sárközi .**

- Un Modelo de Asignación de Recursos a Rutas en el Sistema de Transporte Masivo Transmilenio

**Duarte, Sergio**

**Becerra, David**

**Niño, Luis Fernando**

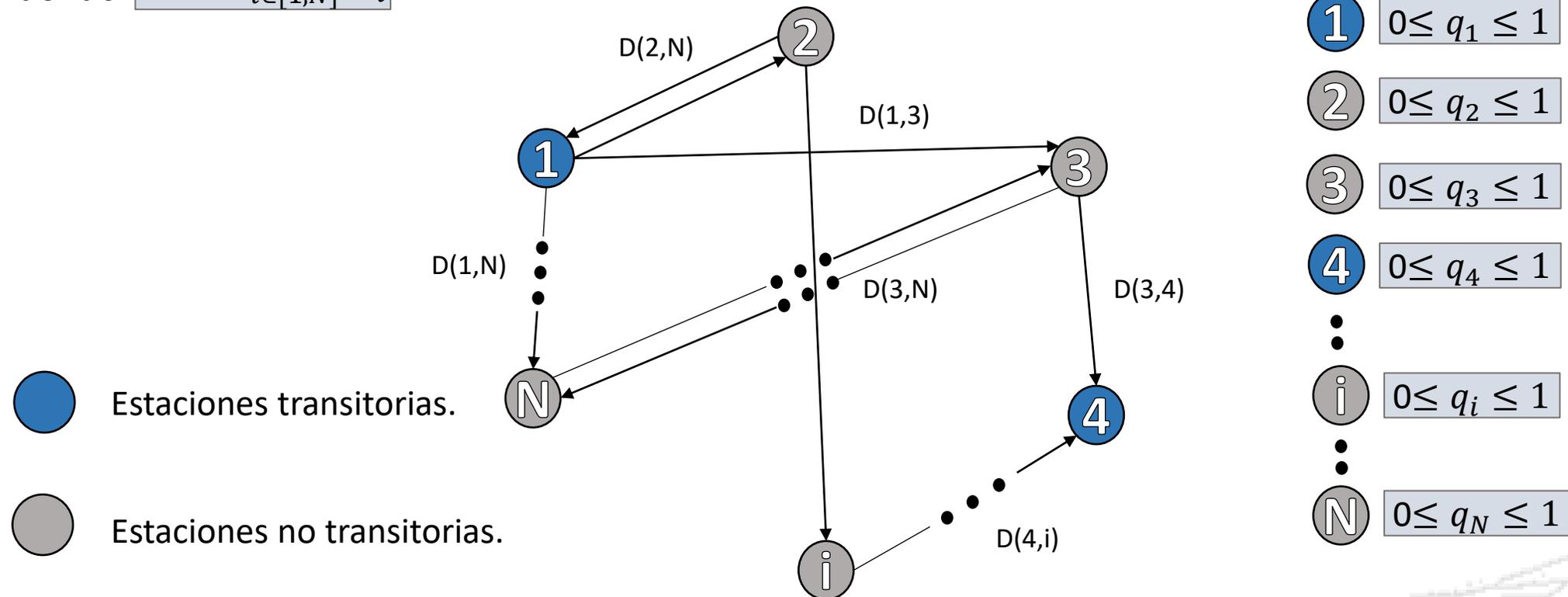
**$D \sim U(a, b)$   
Queue**

**$D \sim \text{Erlang}(\lambda)$**

# MÉTODO APLICADO (Modelo exploratorio)

## DISEÑO DE RUTAS – PROBLEMA GENERALIZADO

Sea  $R$  una red de  $N$  puntos tal que  $N \leq m \leq N(N - 1)$  es la cantidad de conexiones, donde cada nodo debe estar conectado, por lo menos, a algún otro nodo, esto es,  $1 \leq m_i \leq N - 1$  para cada nodo  $i$ , donde  $m = \sum_{i \in [1, N]} m_i$ .



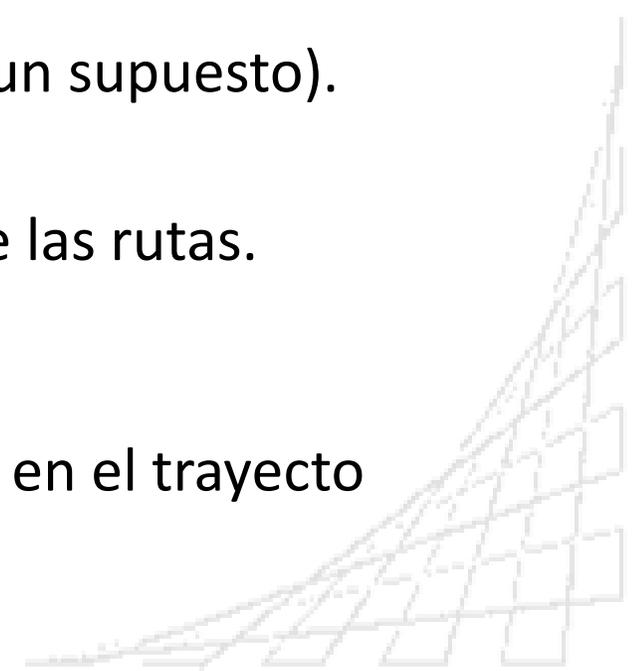
## DISEÑO DE RUTAS – COSTOS CONSIDERADOS

Se tuvo en cuenta tres costos:

- ▶ Costo por la atención de la demanda.
- ▶ Costo por mantenimiento de la flota(requiere del uso de un supuesto).
- ▶ Costo de incluir un tramo en el trayecto de alguna de las rutas.

Estos toman valor cuando se incluye un tramo entre dos estaciones en el trayecto de alguna ruta.

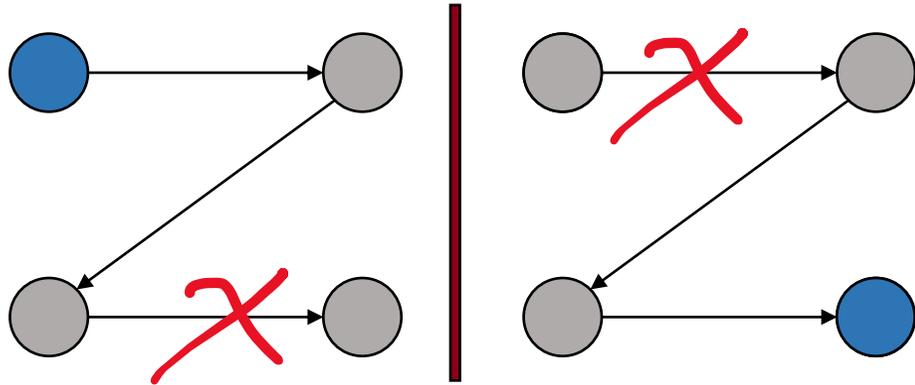
El objetivo principal es la **reducción de los costos de la operación.**



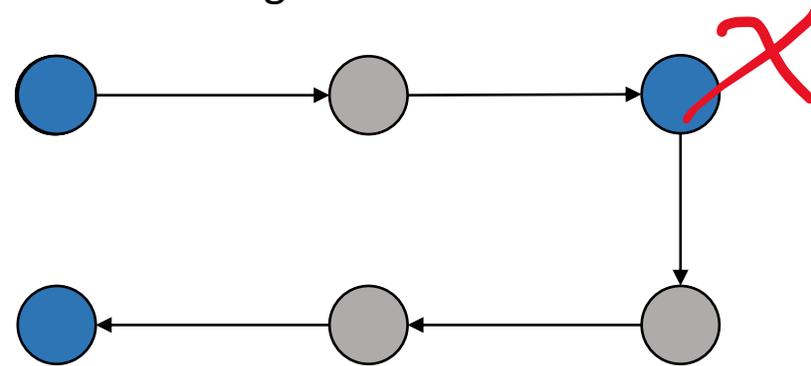
# MÉTODO APLICADO (Modelo exploratorio)

## DISEÑO DE RUTAS - RESTRICCIONES

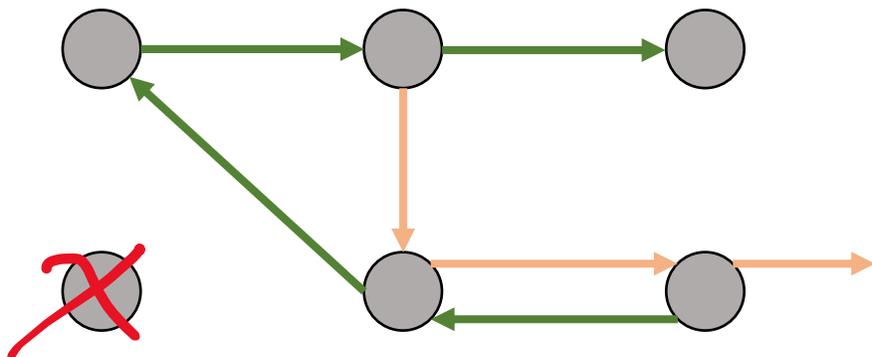
Ninguna ruta iniciará o terminará en una estación transitoria.



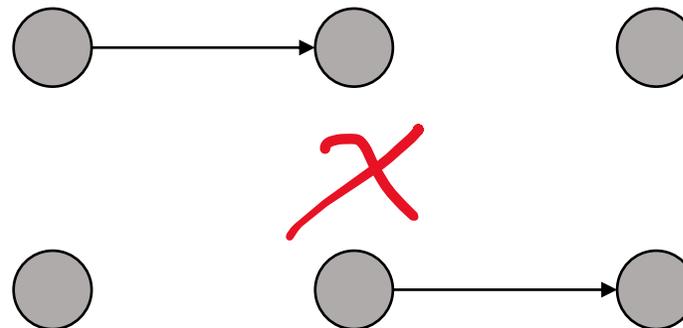
Ninguna ruta pasará por una estación no transitoria de largo.



Cada estación debe estar en, por lo menos, un trayecto de cualquiera de las rutas.

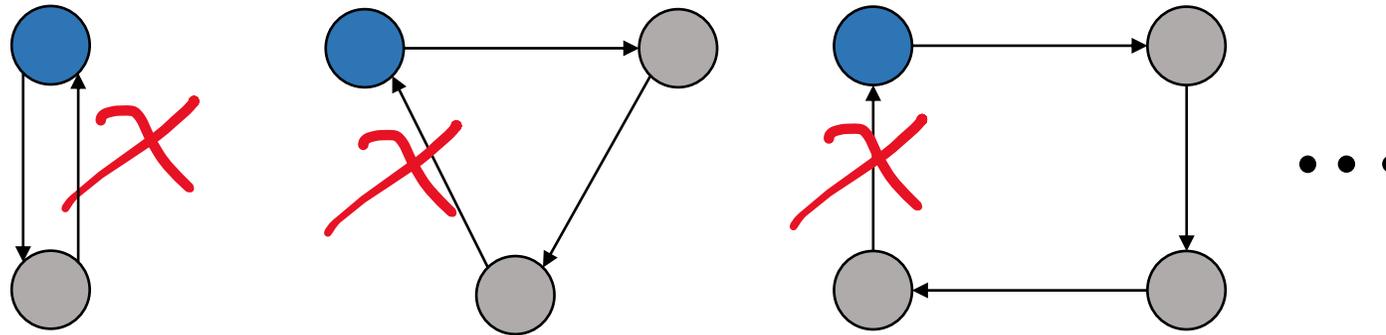


Debe existir la continuidad en el recorrido de una ruta.

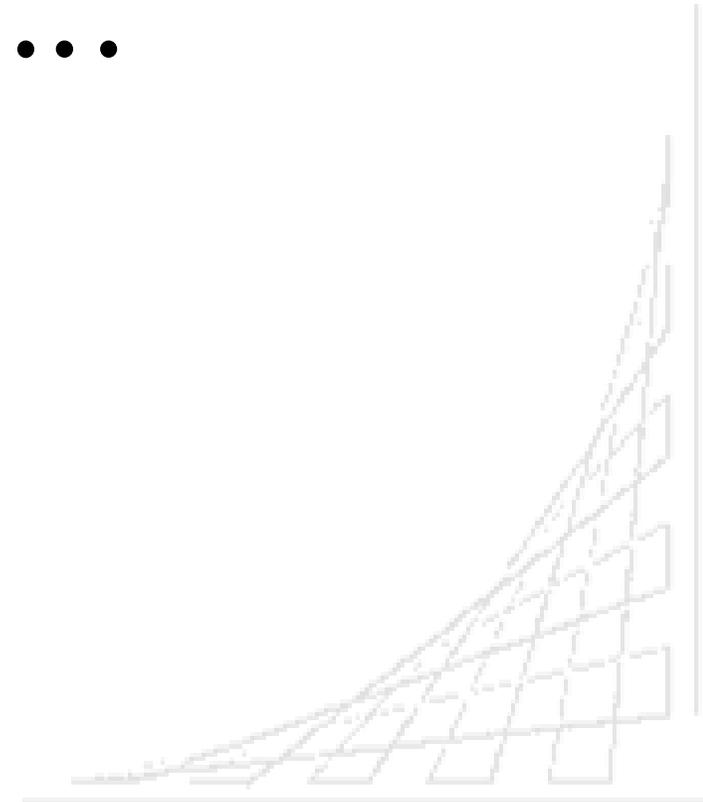
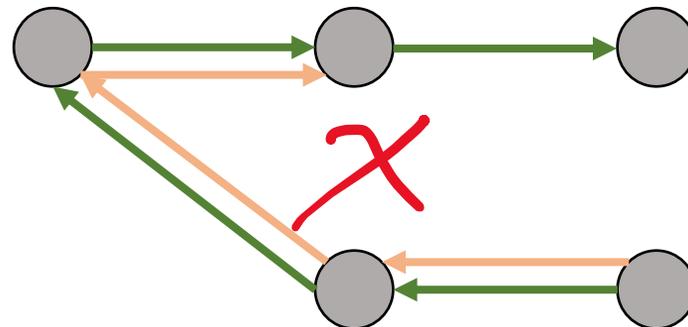


## DISEÑO DE RUTAS - RESTRICCIONES

Ninguna ruta debe ser cerrada en sí misma (eliminación de subtours en el TSP).

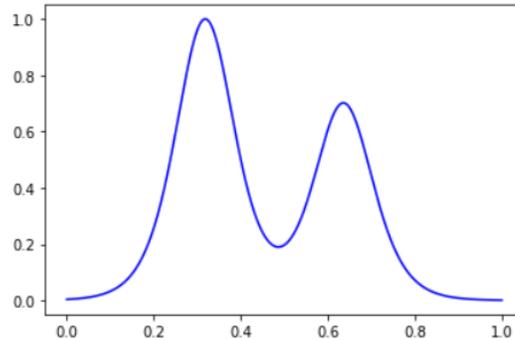


Ninguna ruta contendrá a otra en su recorrido



## DISEÑO DE RUTAS – SUPUESTOS Y ENTRADAS DEL MODELO

1. La demanda se conoce con certeza y puede ser satisfecha con las conexiones existentes.
2. La demanda tendrá un comportamiento bimodal, al menos para el modelo teórico.

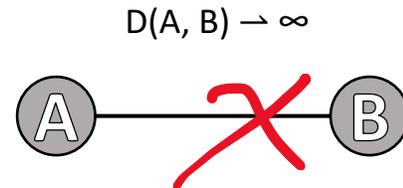


3. Se trabajará con una flota homogénea.
4. El costo de mantenimiento de la flota es directamente proporcional al factor de demanda.



## DISEÑO DE RUTAS – SUPUESTOS Y ENTRADAS DEL MODELO

1. Nombres de las estaciones.
2. Conexiones entre estaciones establecidas a partir de la distancia entre ellas.



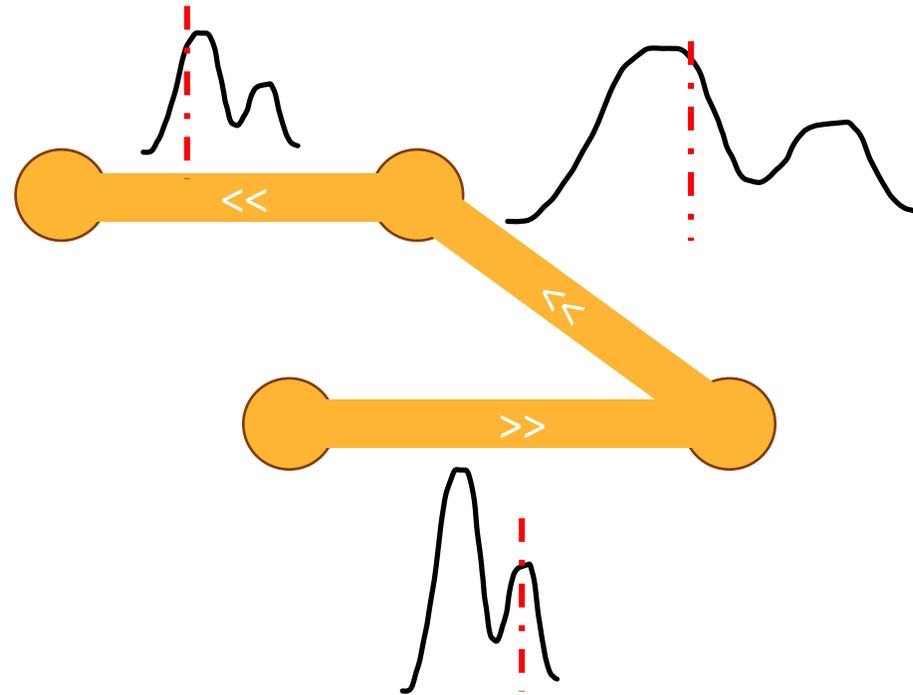
3. Factores de demanda para cada estación.
4. Clasificación entre estaciones transitorias y no transitorias.
5. Demanda entre cada par de estaciones como una matriz de  $N \times N$  separada por intervalos.



## ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS – PROBLEMA GENERALIZADO

Sea  $S$  el conjunto de rutas asignadas a la red  $R$  con el objetivo de minimizar el costo de la operación.

¿Cuándo es el mejor momento para enviar un vehículo por una de las rutas?

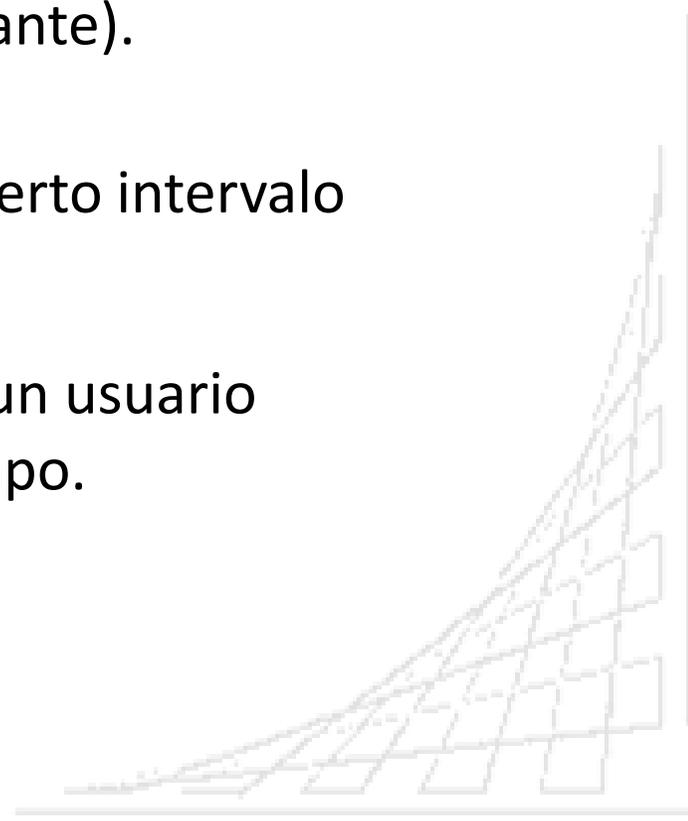


## ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS – COSTOS CONSIDERADOS

Se tuvo en cuenta tres costos:

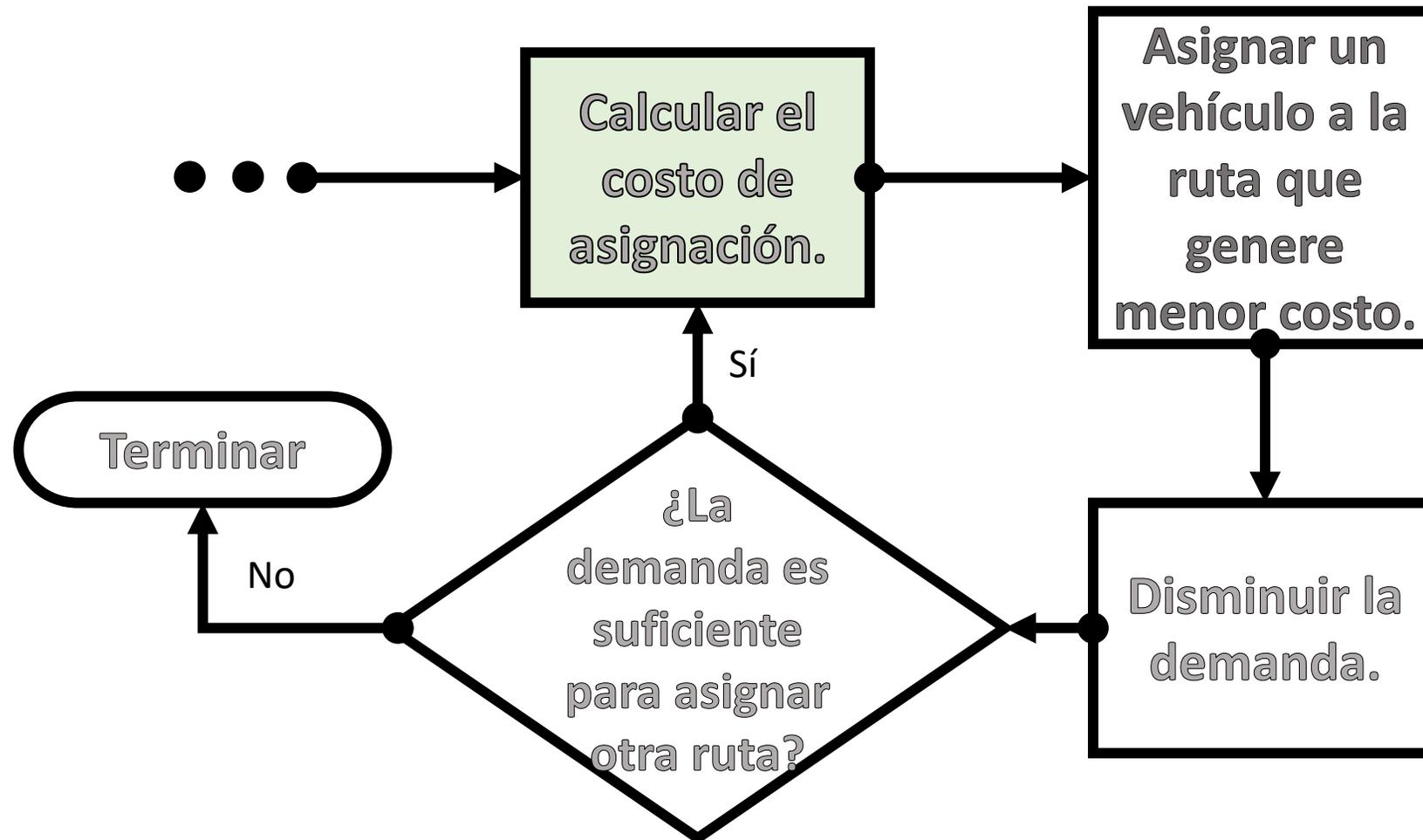
- ▶ Costo por la operación de un bus en la ruta asignada (constante).
- ▶ Costo por la permanencia de un puesto vacío durante cierto intervalo de tiempo.
  - ▶ Costo asociado a la espera de un bus por parte de un usuario dentro del sistema durante cierto intervalo de tiempo.

El objetivo principal es la **reducción de los costos de la operación.**



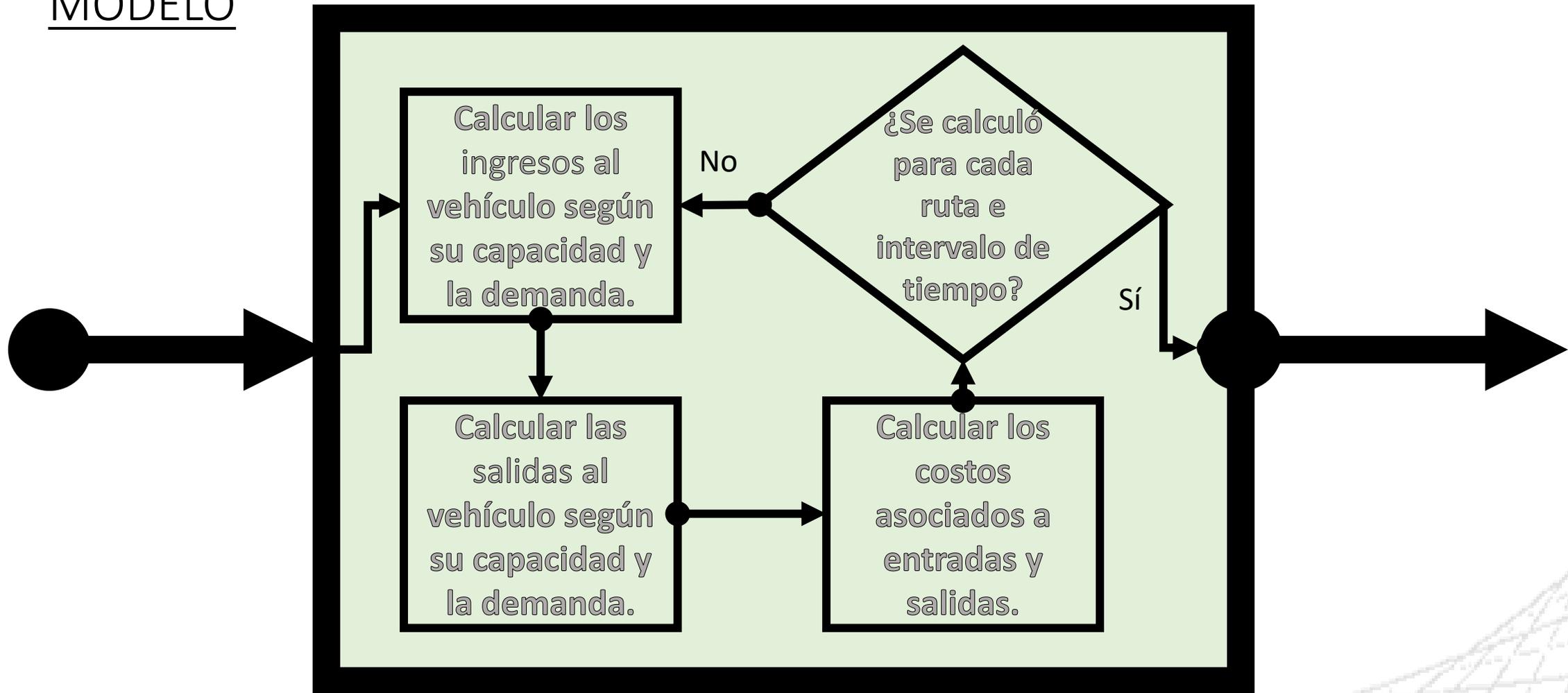
# MÉTODO APLICADO (Modelo exploratorio)

## ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS – DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO



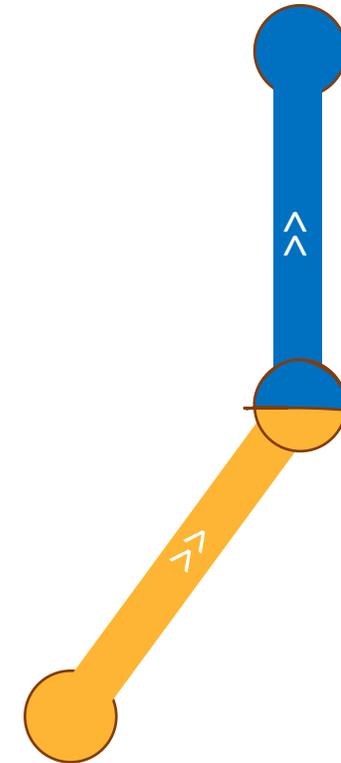
# MÉTODO APLICADO (Modelo exploratorio)

## ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS (**BUSES**) – DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO



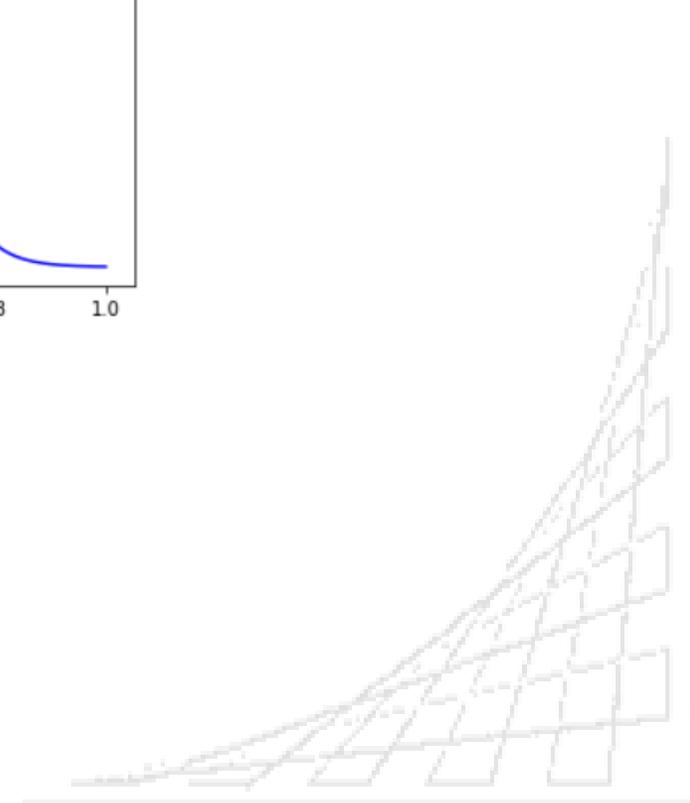
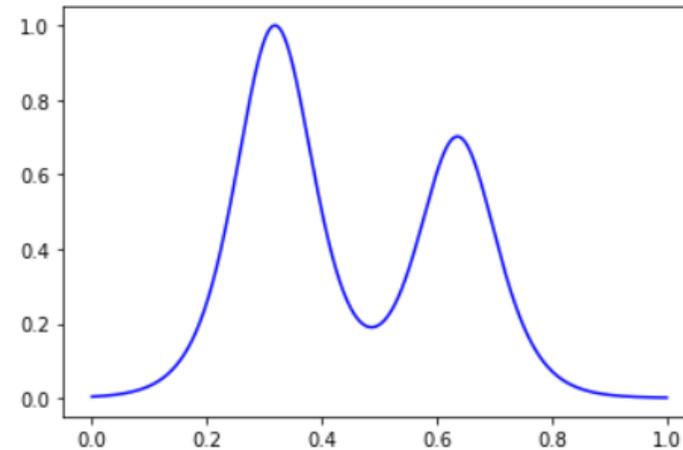
## DISEÑO DE RUTAS – SUPUESTOS Y ENTRADAS DEL MODELO

1. Demanda determinística y con comportamiento bimodal.
2. Flota homogénea.
3. Existen los transbordos, únicamente usando dos rutas.
4. El primer tramo de un transbordo se asume de 2.5 horas de duración.
5. Los vehículos se desplazan con velocidad constante.



## ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS – SUPUESTOS Y ENTRADAS DEL MODELO

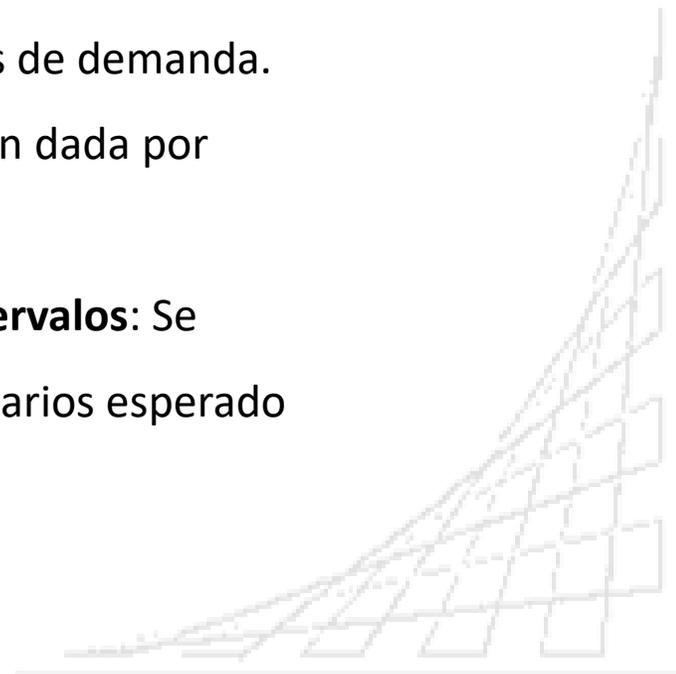
1. El trayecto de cada ruta.
2. Factor de uso de cada par de estaciones.
3. Velocidad de los vehículos dentro del sistema.
4. Distancias entre cada par de estaciones.
5. Distribución bimodal de demanda teórica.
6. Costos.
7. Longitud de cada intervalo (15 minutos, 30 minutos, etc.).
8. Hora de inicio y terminación de la atención dentro del sistema.
9. Máxima cantidad de usuarios esperada entre estaciones durante un intervalo.



# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## ENTRADAS DEL MODELO DURANTE EL DISEÑO DE LAS RUTAS

1. **Nombres de las estaciones:** Estación 1 - estación 13.
2. **Conexiones entre estaciones establecidas a partir de la distancia entre ellas:** Se tomaron 13 estaciones del sistema de TM aleatoriamente.
3. **Factores de demanda para cada estación:** Evaluación cualitativa entre los volúmenes de demanda.
4. **Clasificación entre estaciones transitorias y no transitorias:** Se empleó la clasificación dada por TM.
5. **Demanda entre cada par de estaciones como una matriz de  $N \times N$  separada por intervalos:** Se calculó como el producto entre los factores de demanda y el máximo número de usuarios esperado durante un intervalo.

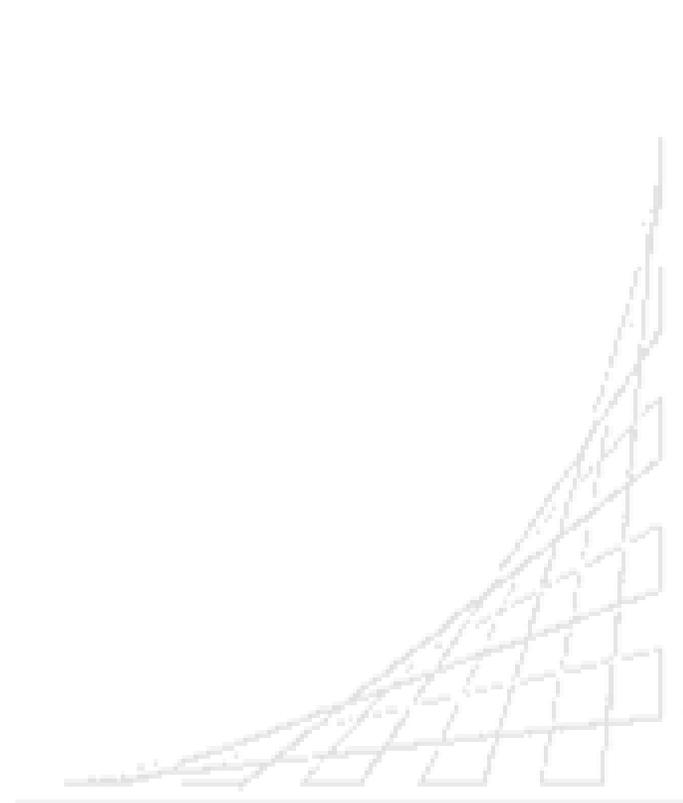


# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## ENTRADAS DEL MODELO DURANTE LA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

### 1. El trayecto de cada ruta: Dado por el primer modelo.

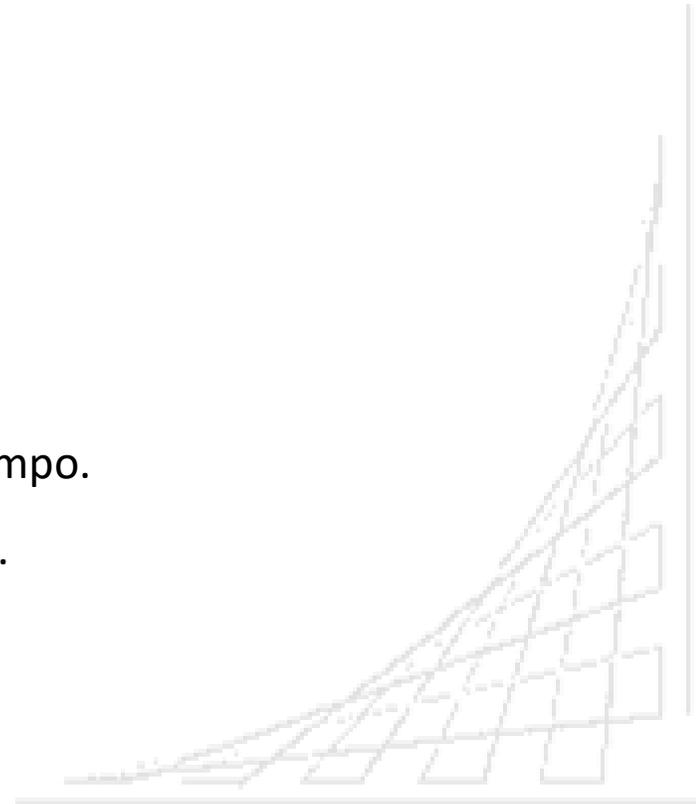
		r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12
Estación 2	Estación 1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 3	Estación 2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 4	Estación 5	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 5	Estación 10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
	Estación 11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 6	Estación 8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 7	Estación 6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 8	Estación 3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 9	Estación 7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Estación 4	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Estación 5	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 10	Estación 11	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	1.000000
	Estación 13	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Estación 5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
Estación 11	Estación 9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Estación 10	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Estación 13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Estación 3	Estación 10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	
Estación 13	Estación 10	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Estación 11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000



# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

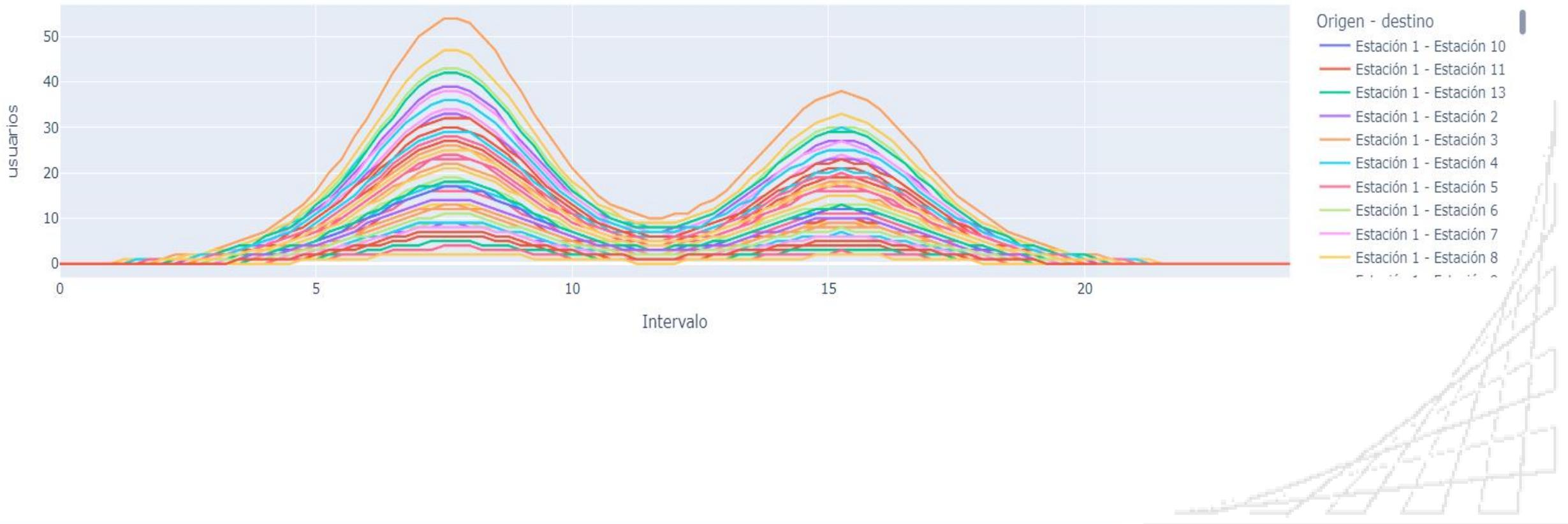
## ENTRADAS DEL MODELO DURANTE LA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

2. **Factor de uso de cada par de estaciones:** Calculadas como el producto de los factores de demanda.
3. **Velocidad de los vehículos dentro del sistema:** 60 kilómetros por hora.
4. **Distribución bimodal de demanda teórica :** Dado.
5. **Costos :** 2.000 u.m. cada uno.
6. **Longitud de cada intervalo:** 15 minutos.
7. **Hora de inicio y terminación de la atención dentro del sistema:** Abierto todo el tiempo.
8. **Máxima cantidad de usuarios esperada entre estaciones durante un intervalo :** 60.



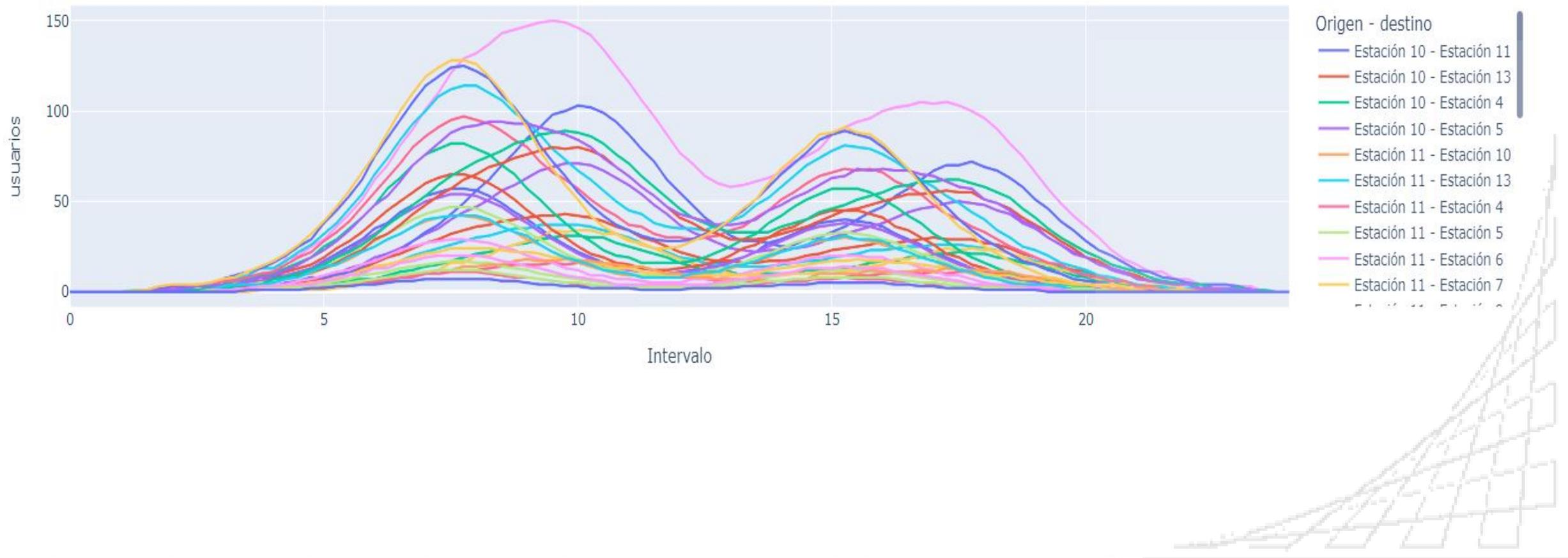
# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## DEMANDA ANTES DEL AJUSTE POR TRANSBORDOS



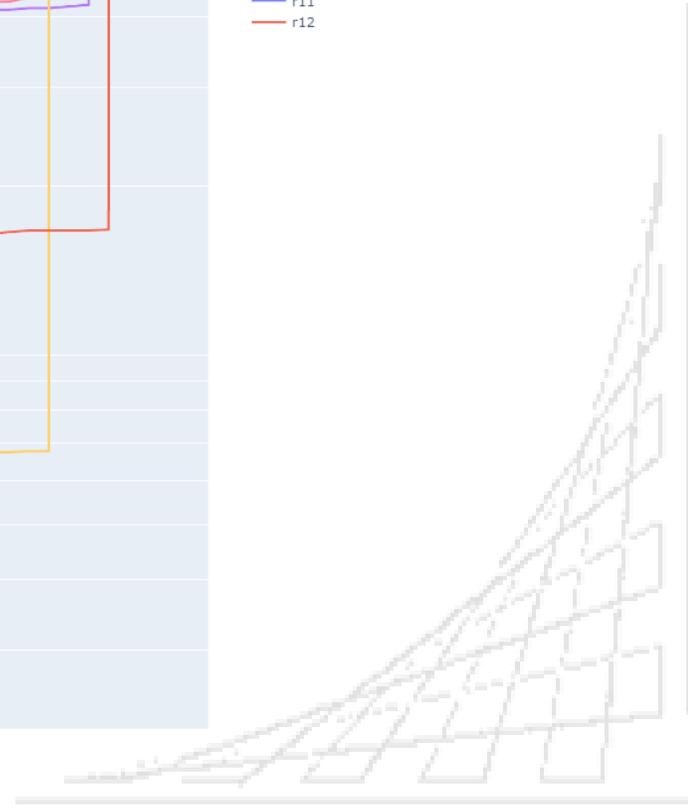
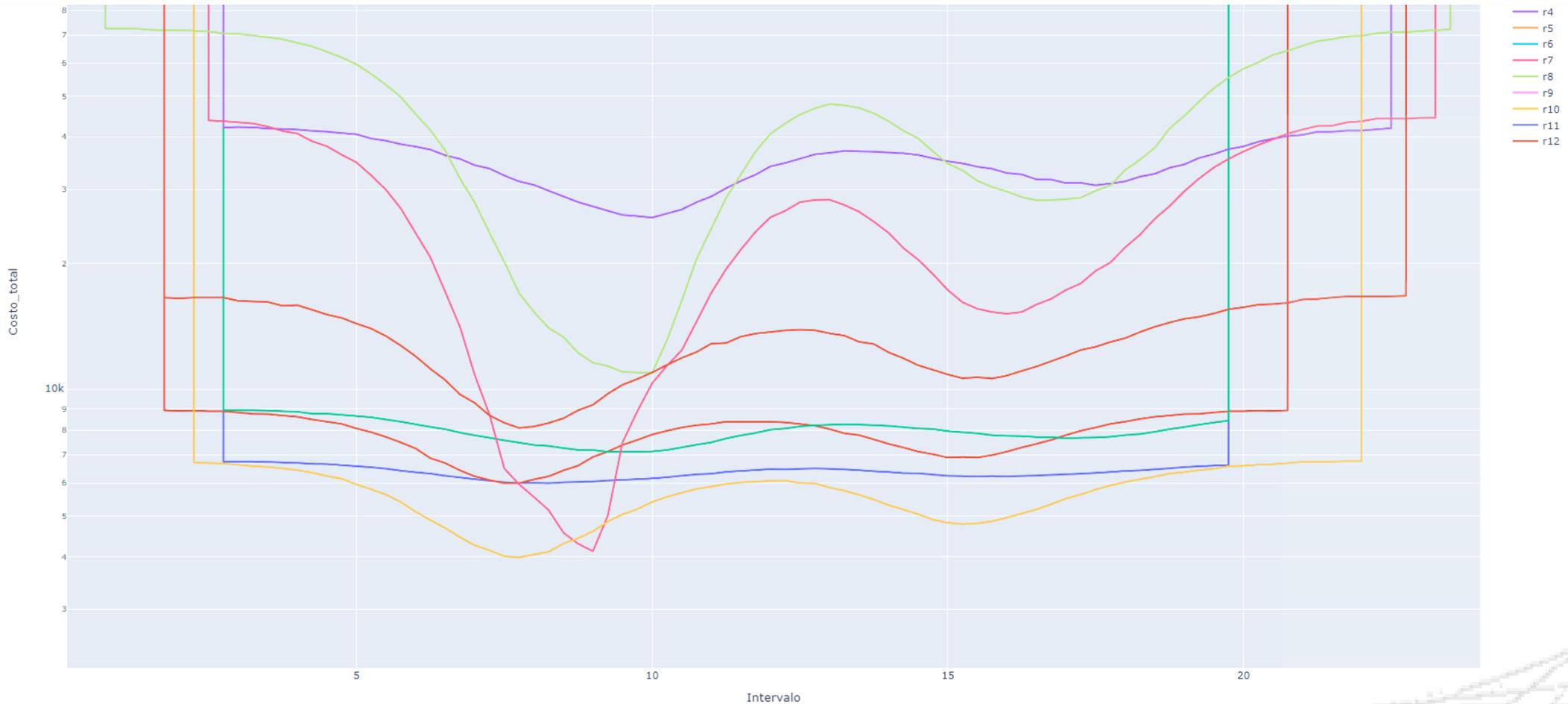
# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## DEMANDA DESPUÉS DEL AJUSTE POR TRANSBORDOS



# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## COSTOS POR ASIGNACIÓN DE CADA RUTA EN UNA DE LAS ITERACIONES

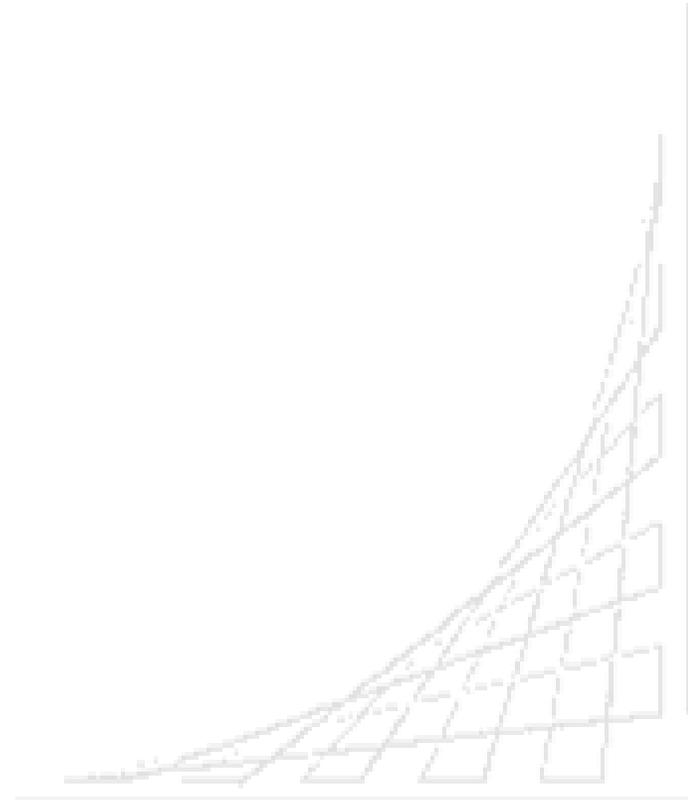
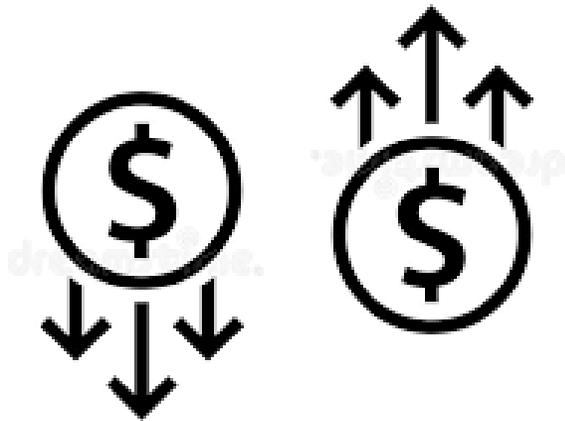


# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se crearon 22 combinaciones distintas para la ponderación de los costos:

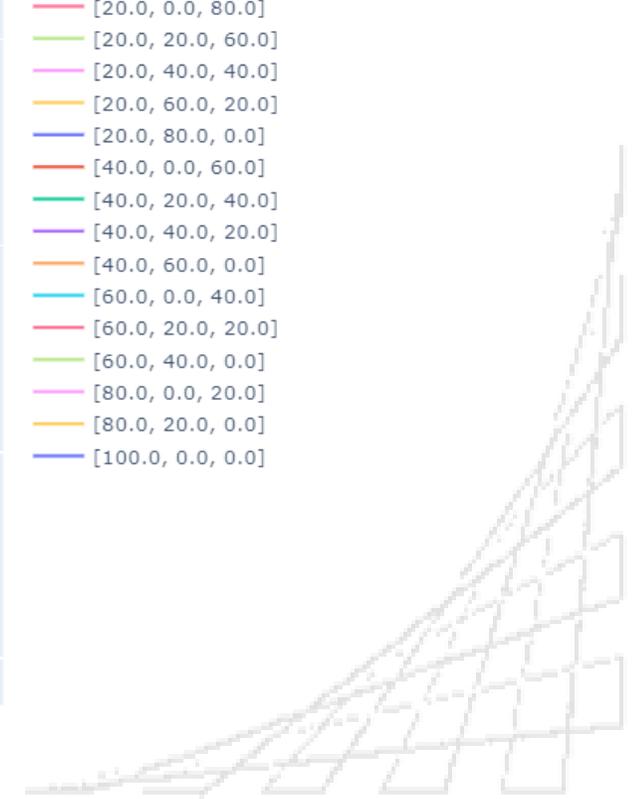
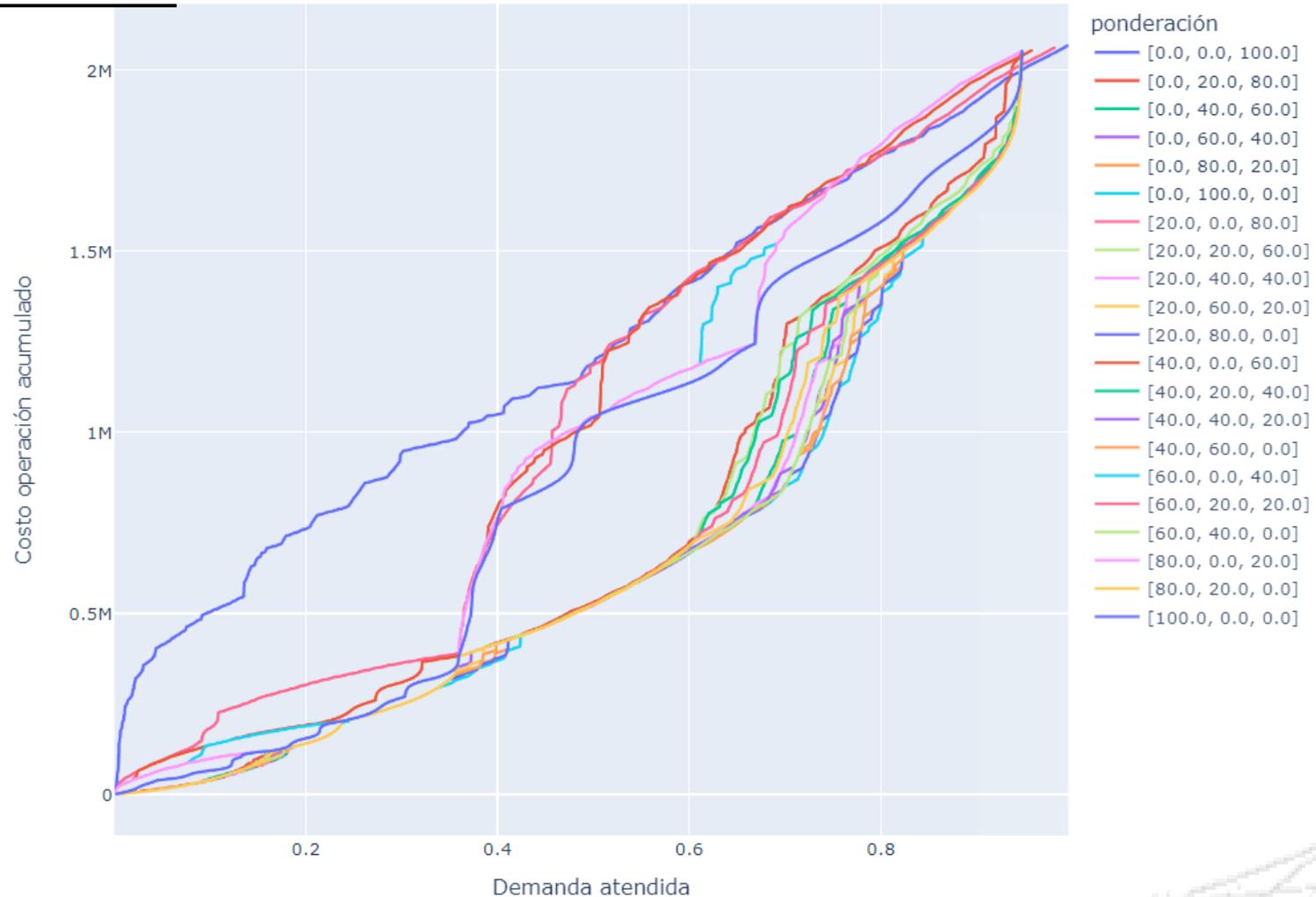
{0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%}



# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

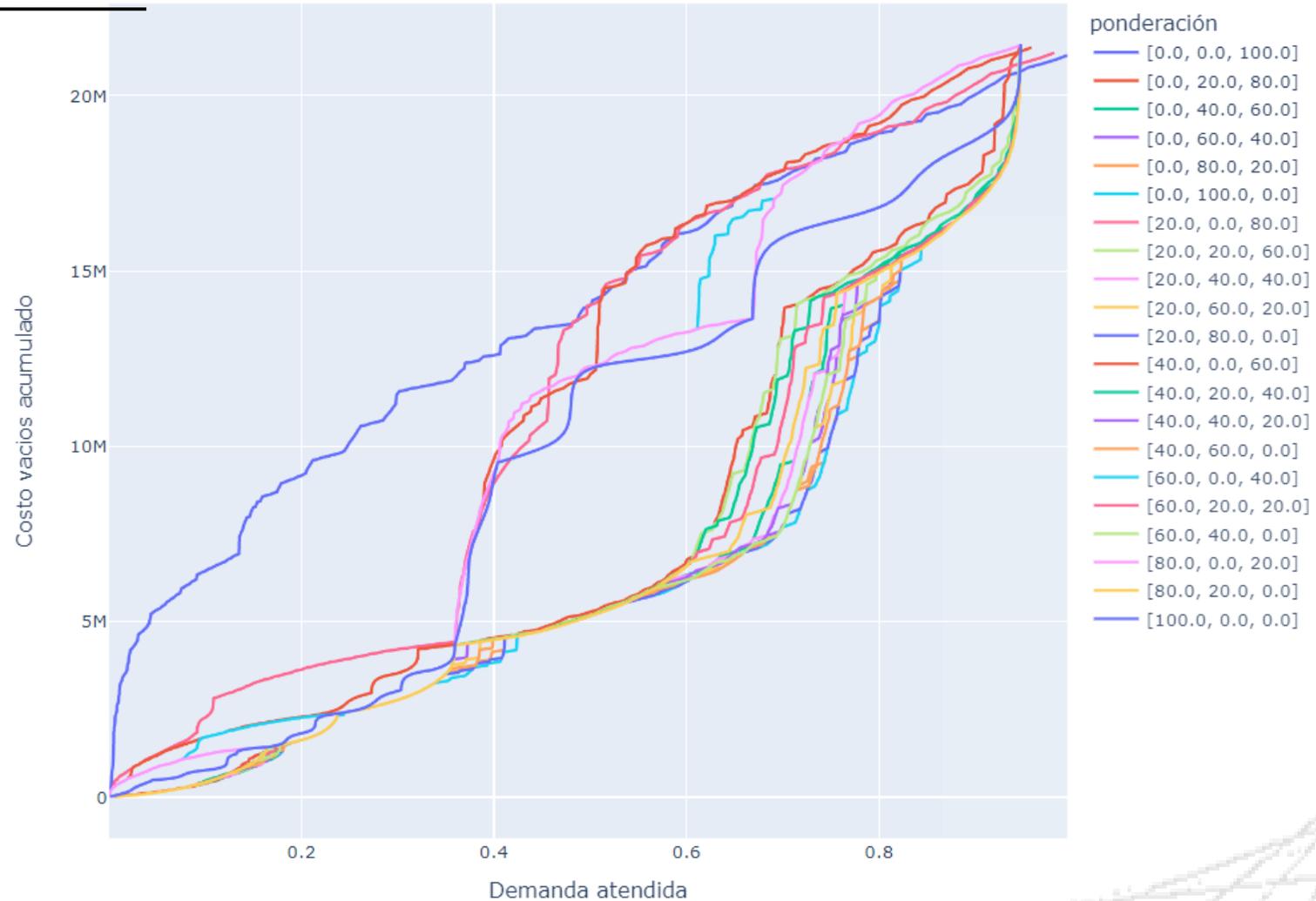
Costo de  
operación



# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

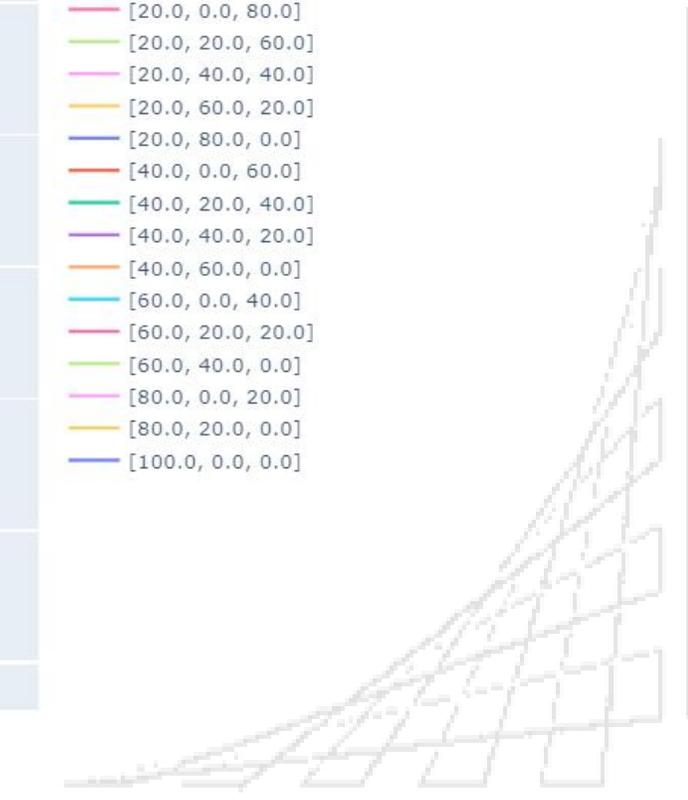
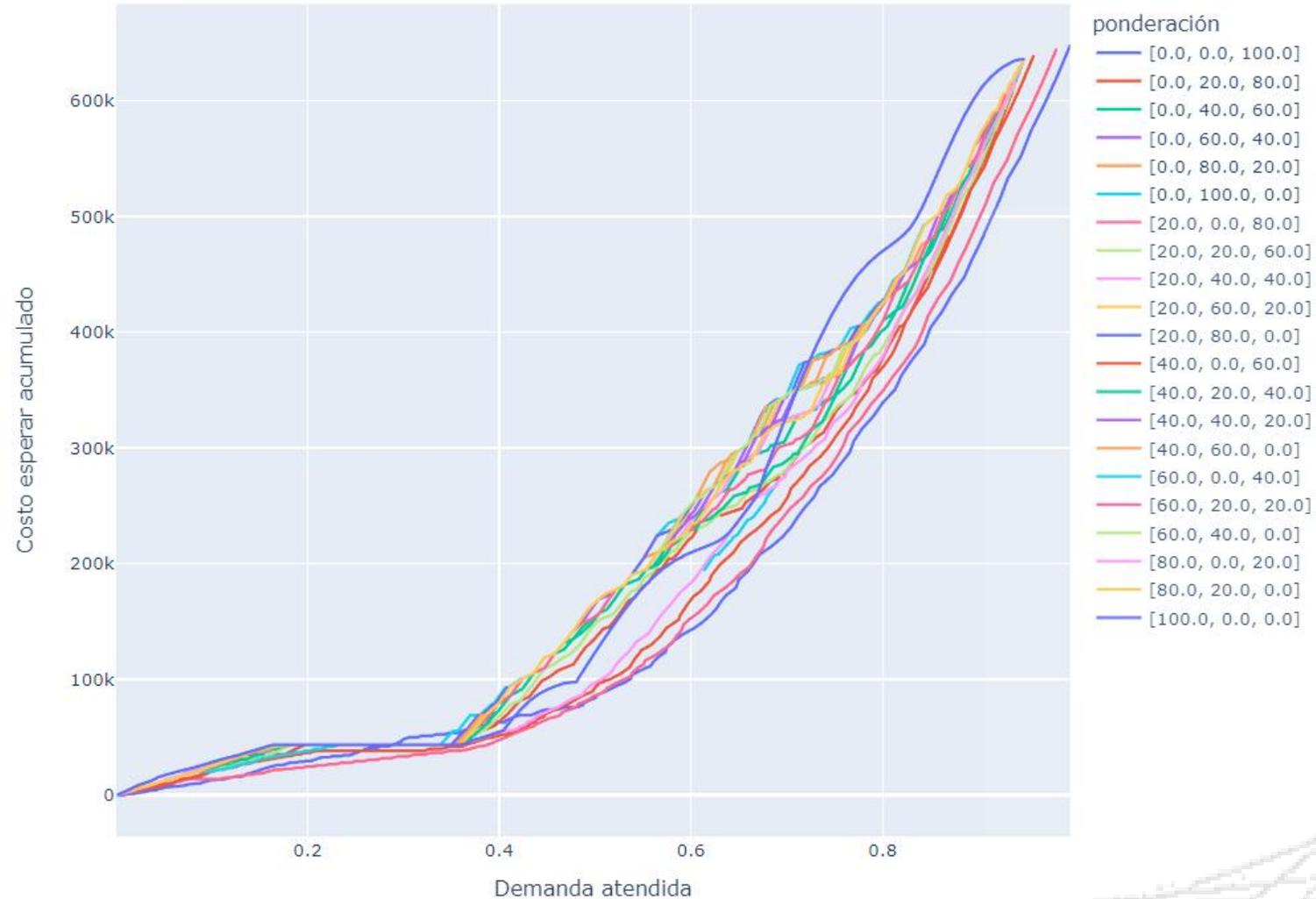
Costo por puestos vacíos



# RESULTADOS AL APLICAR EL MODELO EN UN CONTEXTO FICTICIO

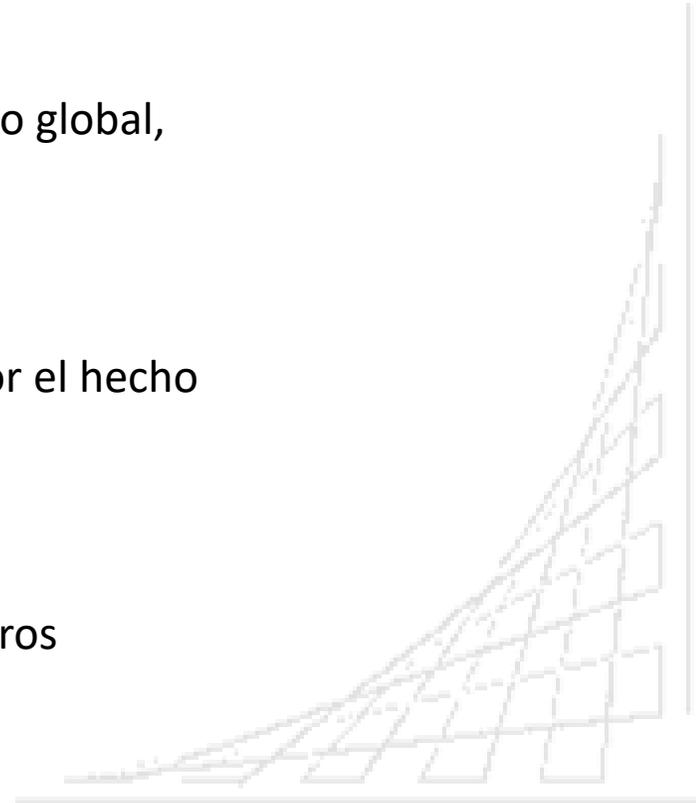
## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Costo por espera



## CONCLUSIONES

- La ponderación de los costos toma relevancia en el caso en el que el objetivo sea conseguir un nivel de servicio  $NS < 100\%$ .
- Con el procedimiento que sigue la heurística se garantiza llegar, si no al costo mínimo global, por lo menos a un costo mínimo global.
- Algunos sistemas de transporte como Transmilenio quedan por fuera del modelo por el hecho de funcionar únicamente bajo limitaciones de demanda.
- Con algunos pequeños cambios en las entidades, el modelo puede funcionar con otros sistemas muy diversos.



## ¿DÓNDE APLICAR EL MODELO?

- Sistemas de transporte de cualquier escala.



Entidades: Usuarios.

Nodos: Estaciones (aeropuertos, estaciones de tren, puertos).

Conexiones: Caminos (rutas de vuelo, carriles, rutas marítimas).



## ¿DÓNDE APLICAR EL MODELO?

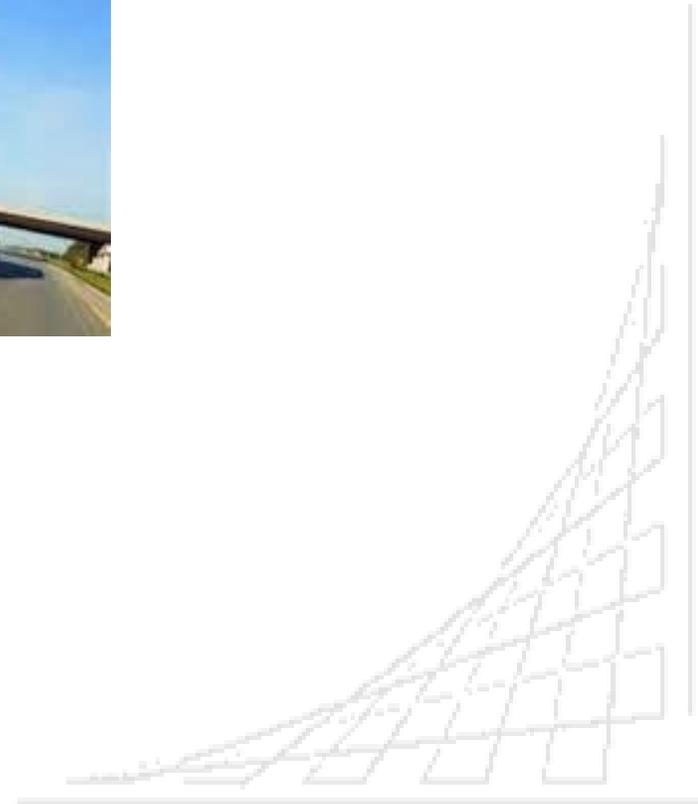
- Sistemas logísticos de distribución **con ordenes programadas.**



Entidades: Productos.

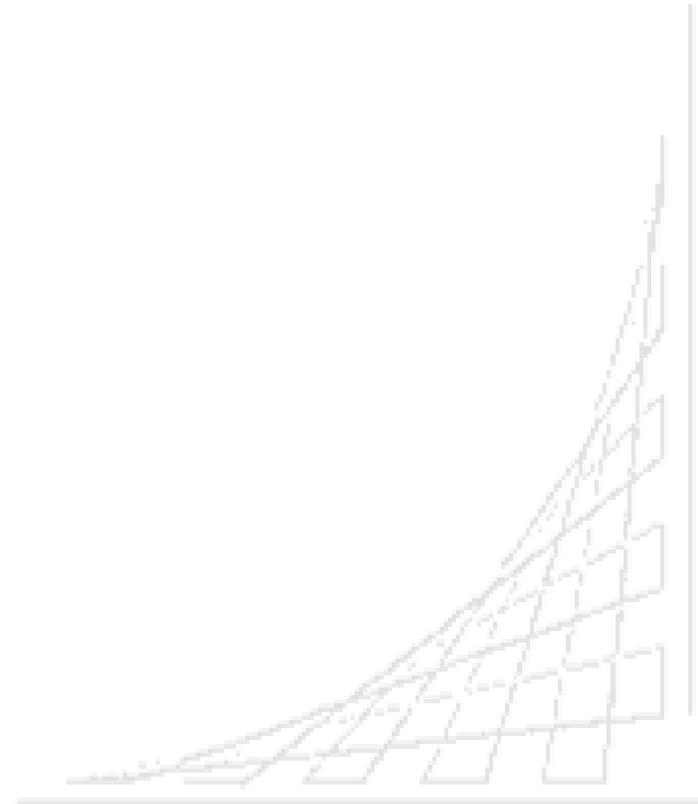
Nodos: Centros de distribución, puertos, etc.

Conexiones: Caminos.



## POSIBLES MEJORAS AL MODELO ACTUAL

- Agregar la asignación de usuarios conforme llegan.
- Evaluar el resultado de la heurística.
- Utilizar el modelo en un contexto real con un sistema de transporte a gran escala.



MUCHAS GRACIAS.

