

## ANEXO 1

### 1.1 Modelo de transporte

Las previsiones de demanda fueron generadas por un modelo de transporte diseñado por el estudio. El modelo fue entregado al INTRANT durante una capacitación dedicada.

#### 1.1.1 Estructura del modelo

El modelo que desarrollamos es muy parecido a un modelo de 4 etapas clásico. A continuación se presenta los principios de la modelación de 4 etapas y luego la estructura específica del modelo de Santo Domingo

##### 1.1.1.1 Presentación rápida del modelo de 4 etapas

El modelo de 4 etapas desglose la interacción entre los viajeros y el sistema de transporte en 4 fases.

1. La generación: en cada zona del área modelizado, cuantos viajes van a iniciar y cuantos van a terminar.
2. La distribución: cuales son los flujos entre las pares de zonas.
3. La elección del modo de transporte
4. La elección del itinerario.

La primera etapa se basa en parámetros socioeconómicos, las tres últimas tratan de reproducir el comportamiento humano: ¿a dónde voy a ir? ¿En carro o en bus? ¿Cuál línea?

A cada decisión individual, el modelo de 4 etapas responde con un algoritmo para reproducir el comportamiento de la totalidad de los viajeros.

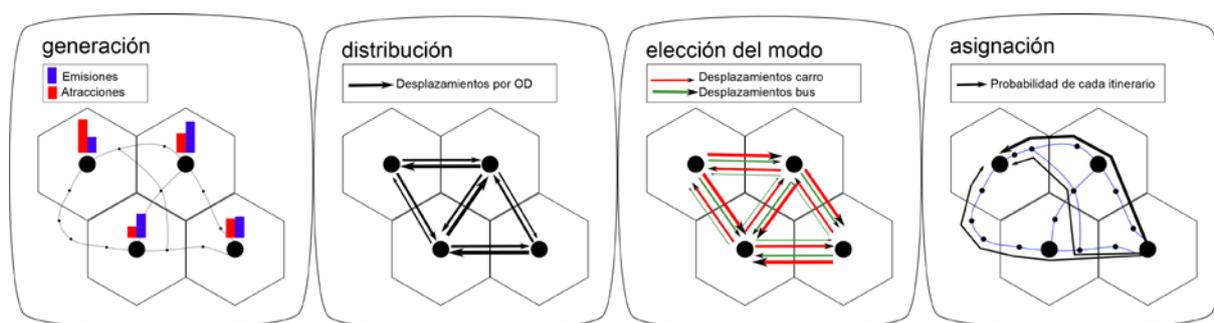


Figure 1. Estructura clásica del modelo de 4 etapas.

En términos de implementación, existe también una etapa de «enumeración de los itinerarios». Que alimenta la elección modal y del itinerario. Ocurre entre la distribución y la elección del modo

##### 1.1.1.2 Estructura de modelo de Santo Domingo

El modelo de Santo Domingo se basa en la teoría de modelo de 4 etapas con unos cambios mínimos.

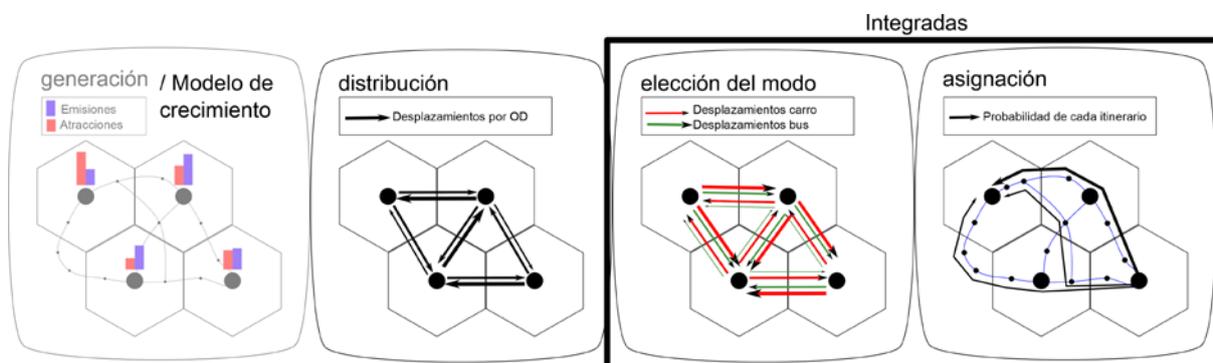


Figure 2. Estructura del modelo de Santo Domingo

1. La etapa de **generación** es muy simple: usa los volúmenes encontrados en la encuesta de hogares y las proyecciones de crecimiento poblacional.
2. La etapa de **distribución** se basa en los datos de la etapa de generación y usa un algoritmo gravitacional doblemente restringido (respecta condiciones de borde: generación y atracción por zona)
3. Hay una etapa de **enumeración** de los itinerarios en carro y en transporte público:
  - a. La enumeración en transportes públicos es una asignación **multi itinerarios**
  - b. La **enumeración de los itinerarios carro es de tipo «todo o nada»** ya que los datos de entrada no permiten una asignación con restricción de capacidad muy precisa.
4. Las etapas de **elección del modo** y de **asignación** son fusionadas en una única etapa de maximización de la utilidad individual. Esta etapa usa un modelo multinomial imbricado (*nested logit*). Resulta en una **asignación probabilista**.

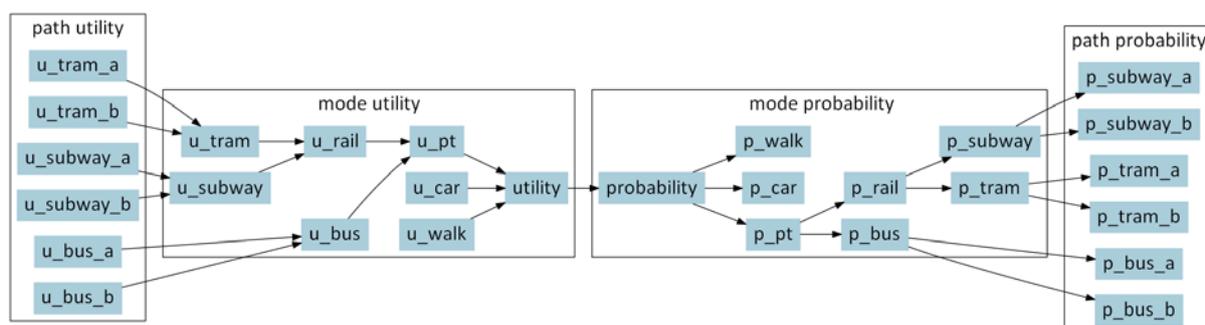


Figure 3. Integración de la elección modal y de la etapa de asignación en el modelo de Santo Domingo

## 1.1.2 Herramientas / software

Se utilizan dos herramientas para diseñar los escenarios y evaluarlos:

- La **aplicación web Itsim** permite el diseño y la optimización de la red.
- La **biblioteca Python Quetzal** ofrece todos los algoritmos necesarios para la implementación del modelo de demanda.

### 1.1.2.1 Diseño y optimización de la red con Itsim

Itsim es una aplicación web diseñada por SYSTRA. Ofrece una interfaz ergonómica para optimizar el trazado de las líneas:

- Calcula automáticamente el itinerario vial de los buses;
- Para cada línea, uno puede escoger el modo de transporte, la velocidad, la frecuencia, el rayo del área de influencia et.
- Puede representar varios datos geo-referenciados como la ubicación de los empleos y de la población
- Al nivel de la línea o de la red completa, calcula indicadores de costo de operación, población y empleos servidos, número de vehículos necesarios etc.
- La red diseñada y optimizada en Itsim puede ser descargado al formato GTFS (*Global Transit Feed Specification*) para alimentar herramientas de previsión de la demanda o sistemas de información al viajero

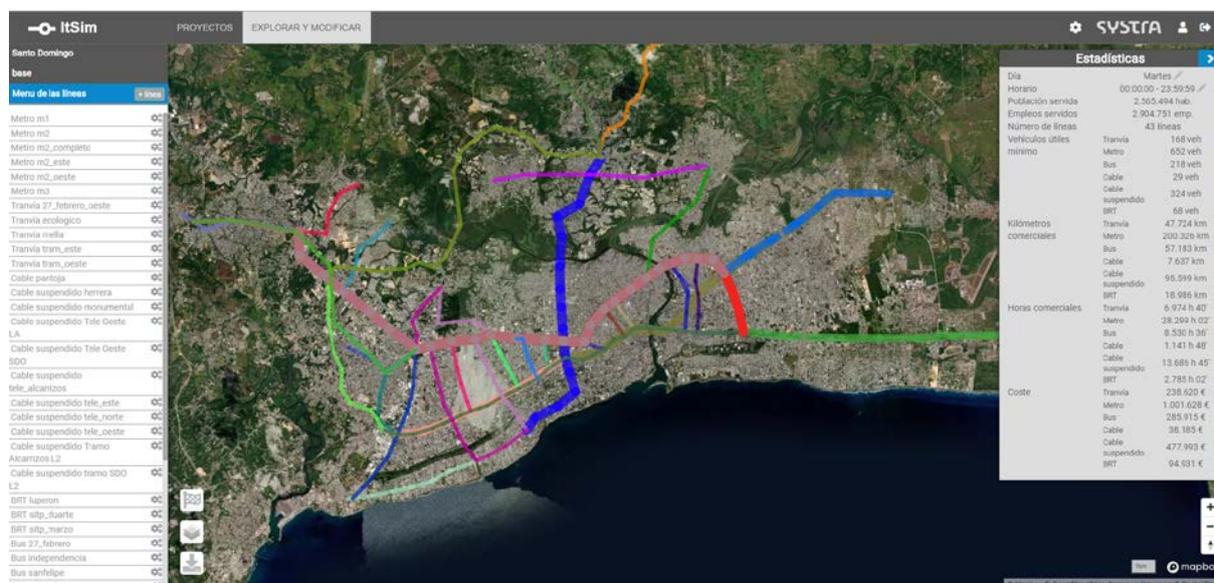


Figure 4. Itsim: mapa general con todas las líneas

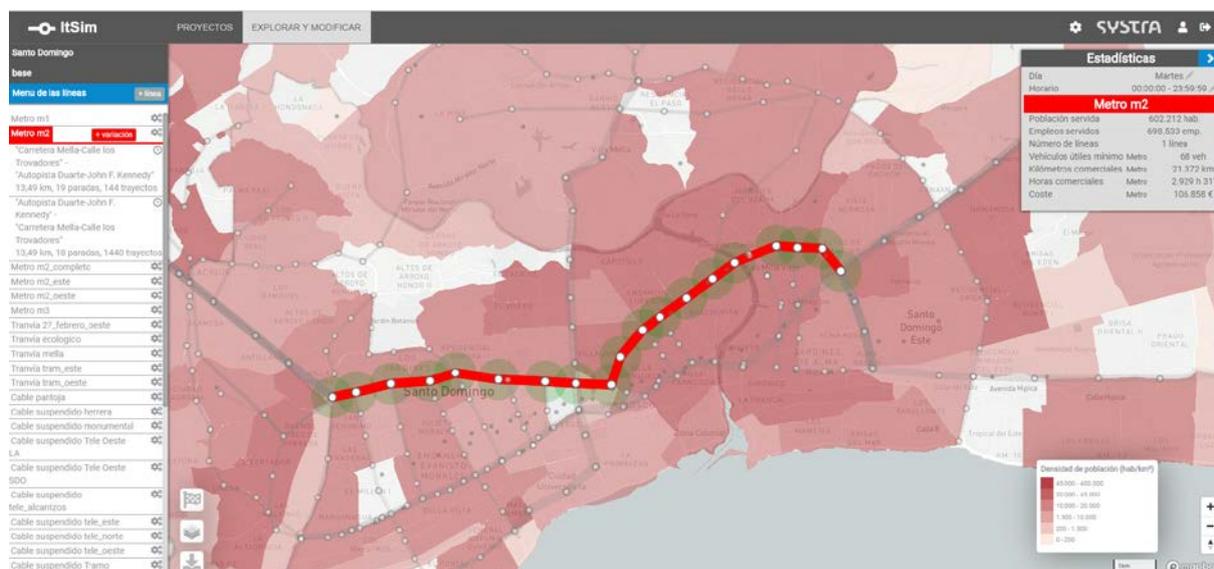


Figure 5. Itsim: enfoque en la línea 2 de metro con la población servida

Una vez diseñada la red con Itsim, se descarga el archivo GTFS y se ingresa en un modelo de previsión de la demanda con Quetzal.

### 1.1.2.2 Modelización 4 etapas con Quetzal

Quetzal es una biblioteca Python para la modelización de los transportes. Fue diseñada por Systra, es una biblioteca *opensource*: de uso libre y gratuita.

La documentación está disponible aquí: <https://systragroup.github.io/quetzal>

Las fuentes pueden descargarse aquí: <https://github.com/systragroup/quetzal>

El modelo usa los métodos de Quetzal para reproducir las etapas descritas en la parte previa. El modelo es una carpeta con datos de entrada, parámetros y una organización de scripts Python.

**Para evaluar un escenario el procedimiento es el siguiente:**

1. Definimos los **parámetros** en un fichero Excel
2. Juntamos los **datos de entrada** se juntan en una carpeta dedicada
3. Definimos la **estructura del modelo** en los notebooks (scripts) que se basan en los algoritmos escritos en Quetzal.
4. Para correr el modelo uno **ejecutamos el script principal**
5. Los indicadores y mapas son generados automáticamente
6. Los datos de salida son exportados hacia una carpeta dedicada.

viajeros en los transportes públicos en el sentido más cargado en la hora pico

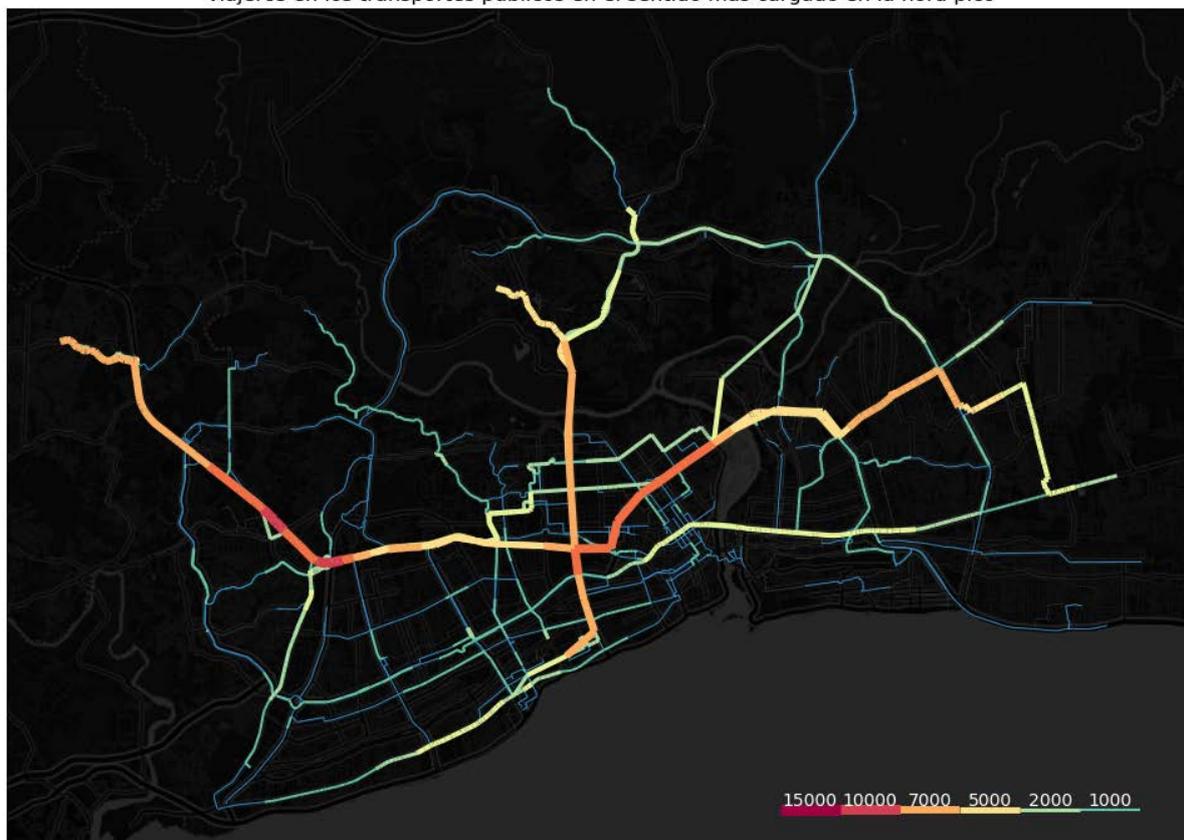


Figure 6. Ejemplo de mapa automático: flujos en los transportes públicos

viajeros en carro en el sentido más cargado en la hora pico



Figure 7. Ejemplo de mapa automático: flujos en carro

### 1.1.3 Datos de entrada y de calibración

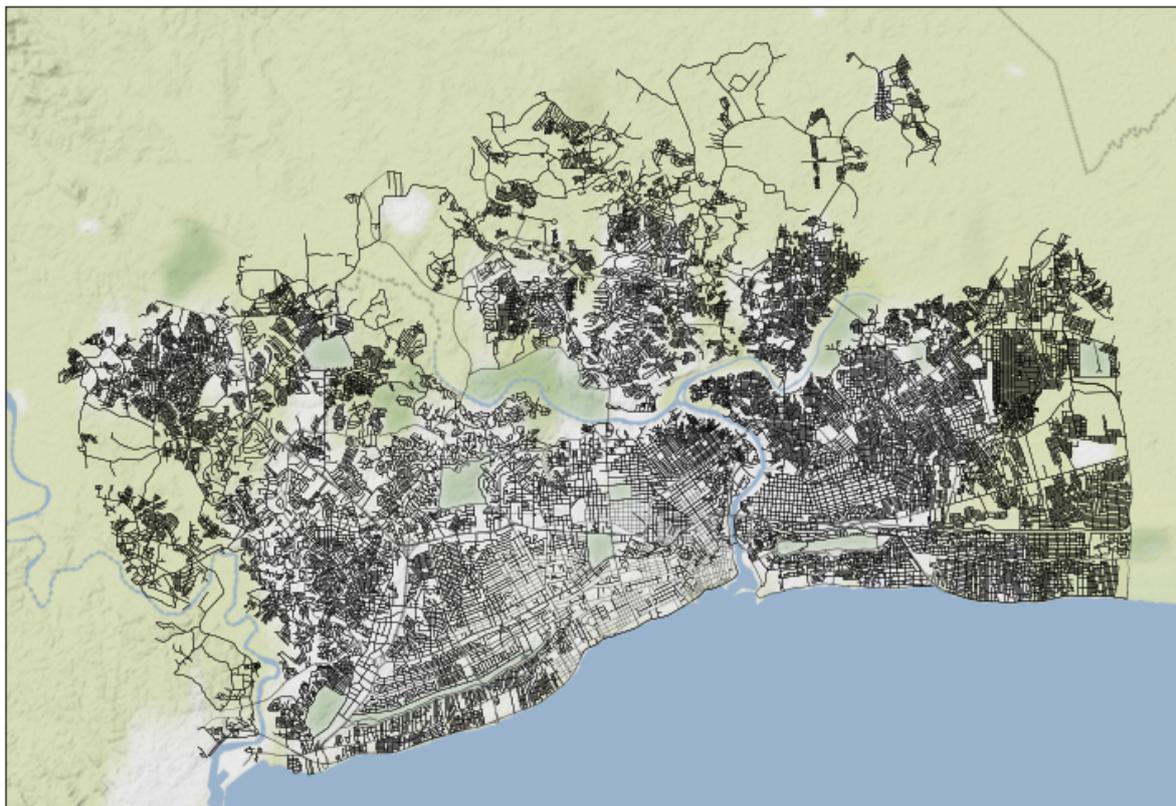
El modelo se basa en varios tipos de datos. Los datos de entrada se utilizan para construir el modelo «preliminar». Por otro lado, los datos de calibración sirven para ajustar el modelo y garantizar su coherencia con la situación real

#### 1.1.3.1 Datos de entrada

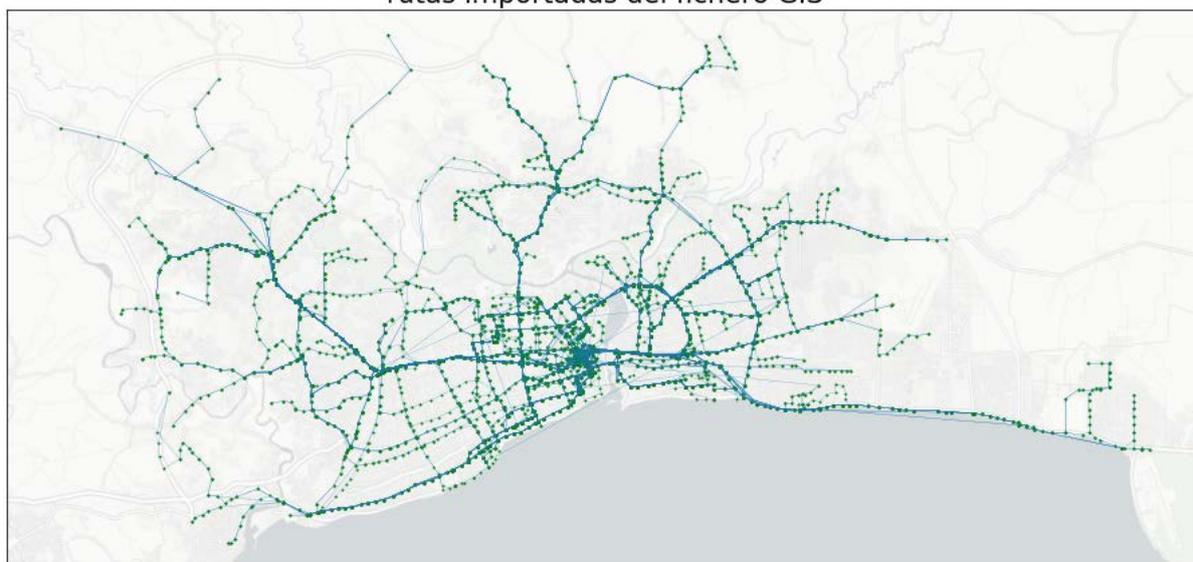
##### Datos recopilados en las instituciones dominicanas o en el internet

- **Zonificación** del país a varios niveles: barrios poblados, sectores, distritos municipales, municipios, provincias y regiones. En el centro del Distrito nacional, usamos el nivel más preciso de zonificación, en las zonas periféricas, usamos una malla más larga.
- **Censo poblacional** del 2010
- **Proyecciones de población** de la oficina nacional de estadística (ONE) para el crecimiento poblacional
- **Red viaria** de OpenStreetMap
- **Redes de metro, de bus, de teleférico:** se codificaron en Itsim
- **Redes de carros públicos y de minibuses:** recopilados en otro estudio de SYSTRA en Santo Domingo en 2018

red viaria usada en el modelo



**Figure 8.** Red viaria usada en el modelo (Openstreetmap)  
rutas importadas del fichero GIS



**Figure 9.** Trazados y estaciones de las redes de bus, de carros públicos y de minibuses

rutas importadas del fichero GTFS (todos escenarios)



**Figure 10. Exporte de las rutas codificadas o diseñadas en Itsim**

Todas las redes de transporte en común se juntaron y se proyectaron automáticamente en la red viaria.

rutas proyectadas en la red viaria (todos escenarios)

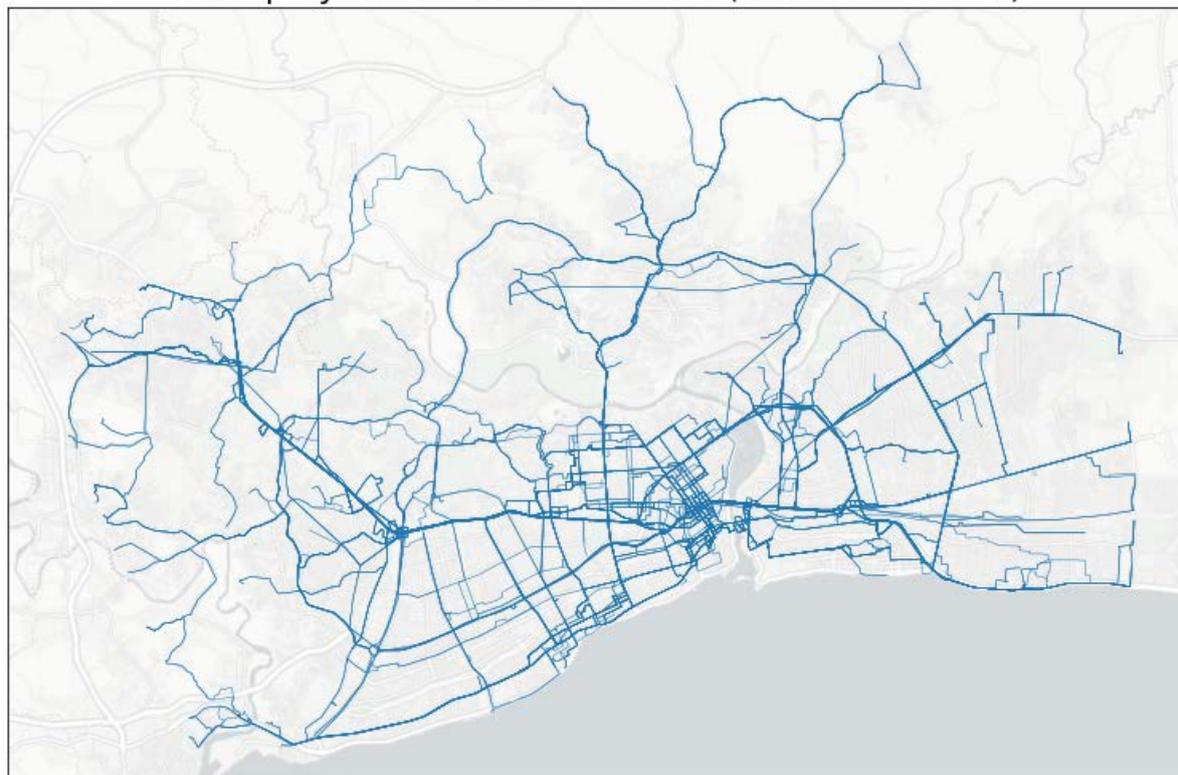


Figure 11. Red de transporte público completa: en adecuación con la red viaria

### Datos recopilados en las encuestas que sirven en la modelación

- Encuesta de movilidad (domiciliaria)
- Encuesta de preferencia declarada

#### 1.1.3.2 Datos de calibración

La calibración se basa mucho en la comparación de los resultados del modelo con los análisis de la encuesta de movilidad. También, la afluencia en la red actual de metro sirvió para la calibración.

### 1.1.4 Calibración

La calibración se hizo etapa por etapa, empezamos con la etapa de generación y distribución. Después calibramos la etapa de elección modal / asignación.

#### 1.1.4.1 Generación

En la situación de referencia usamos directamente la generación de la encuesta de movilidad. Que representamos de forma cualitativa a continuación.

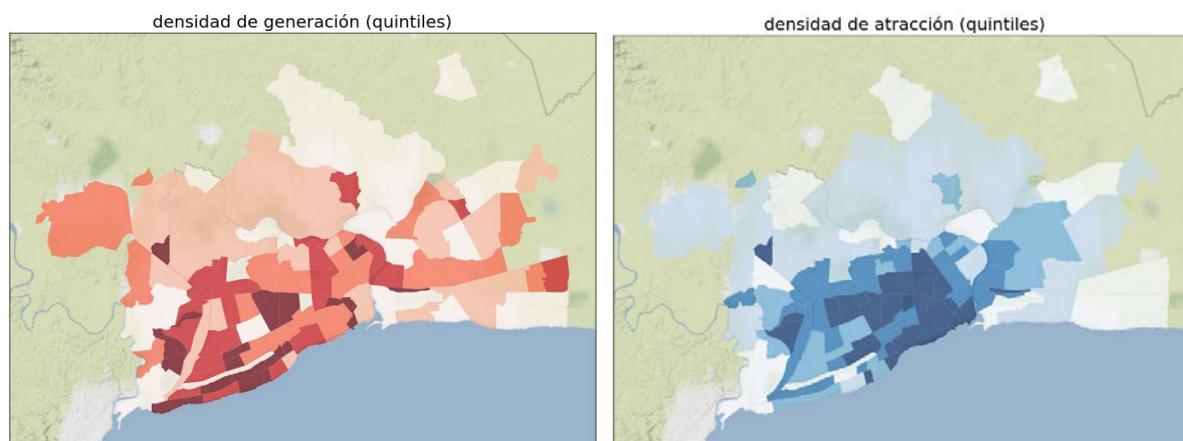


Figure 12. Clasificación de la densidad de generación y de atracción

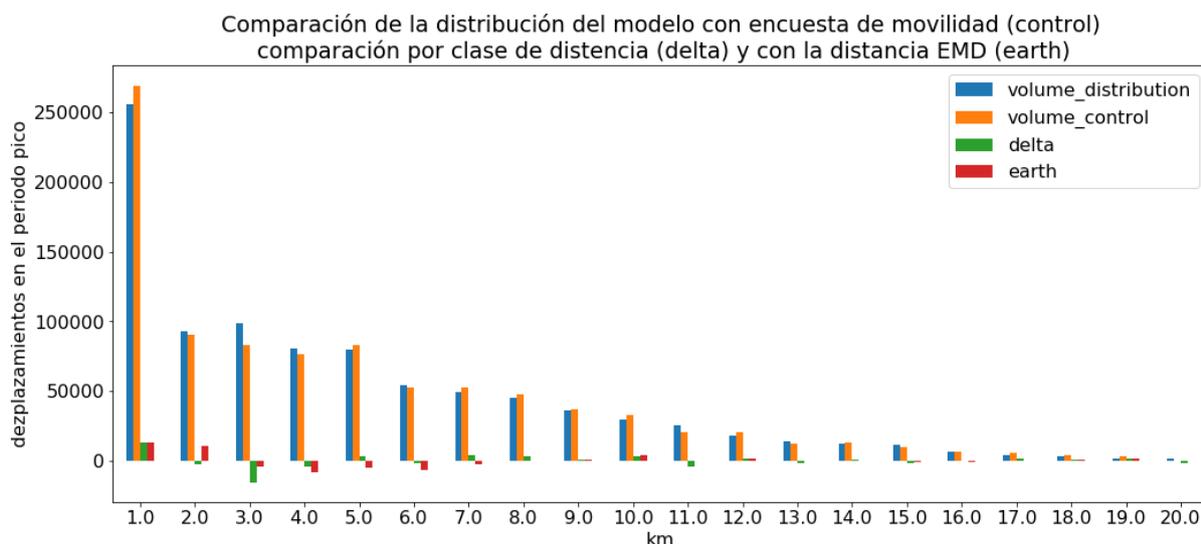
Los viajes generados y atraídos por las zonas sirven de condición de borde en la etapa de distribución.

#### 1.1.4.2 Distribución

Para calibrar la etapa de distribución, se empleó la encuesta de movilidad, monitoreando dos indicadores principales:

1. El volumen de desplazamiento en función de la distancia euclidiana (**distribución de las distancias**)
2. **Los flujos entre los municipios**

**Para cada clase de distancia**, se espera que los volúmenes modelizados y encuestados se acerquen: Si en la encuesta de movilidad, el 10% de los desplazamientos tienen una distancia entre 5km y 7km, se intenta lograr que el 10% de los desplazamientos del modelo tenga una distancia del mismo intervalo.



**Figure 13. Calibración de la distribución: volumen por clase de distancia**

Se compararon los volúmenes clase por clase y se evaluó la calidad de la distribución total con una medida especial llamada «*earth mover's distance*». **Esta comparación permite escoger los parámetros del modelo gravitacional de distribución.**

También se comprobó que la distribución reproduzca bien **los flujos entre los municipios.**

El gráfico abajo representa los flujos de la encuesta en rojo y los del modelo en azul. El tamaño del círculo es proporcional al flujo. Cuando el flujo encuestado supera el flujo modelado, el círculo azul es más grande que el rojo y se ve un círculo azul en la periferia del centro morado. La mayoría de los flujos respecta muy bien la distribución de la encuesta y vemos sobre todo círculos morados.

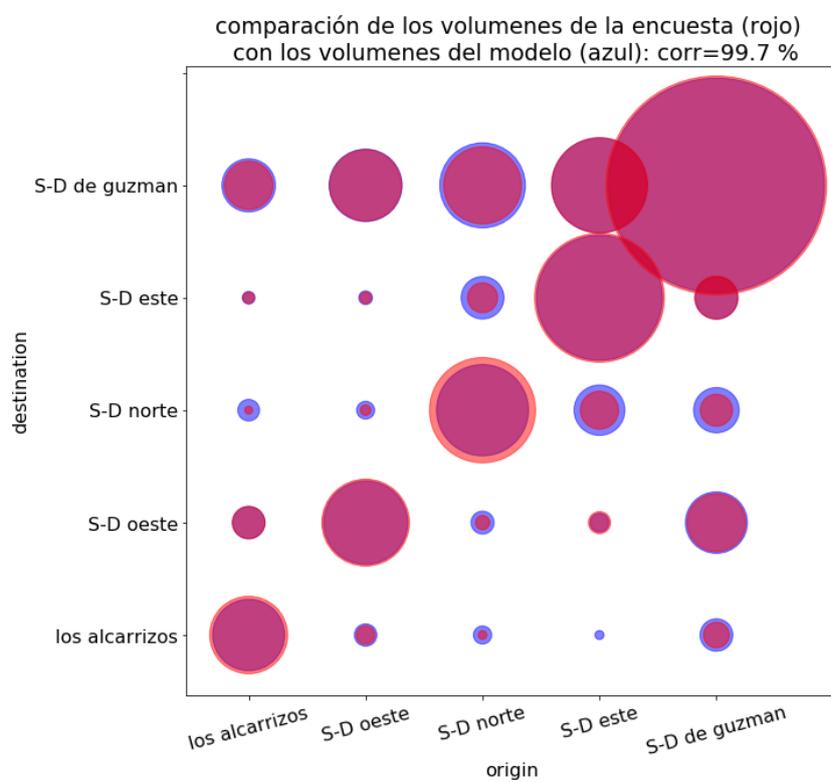


Figure 14. Calibración de los flujos entre municipios: buble chart

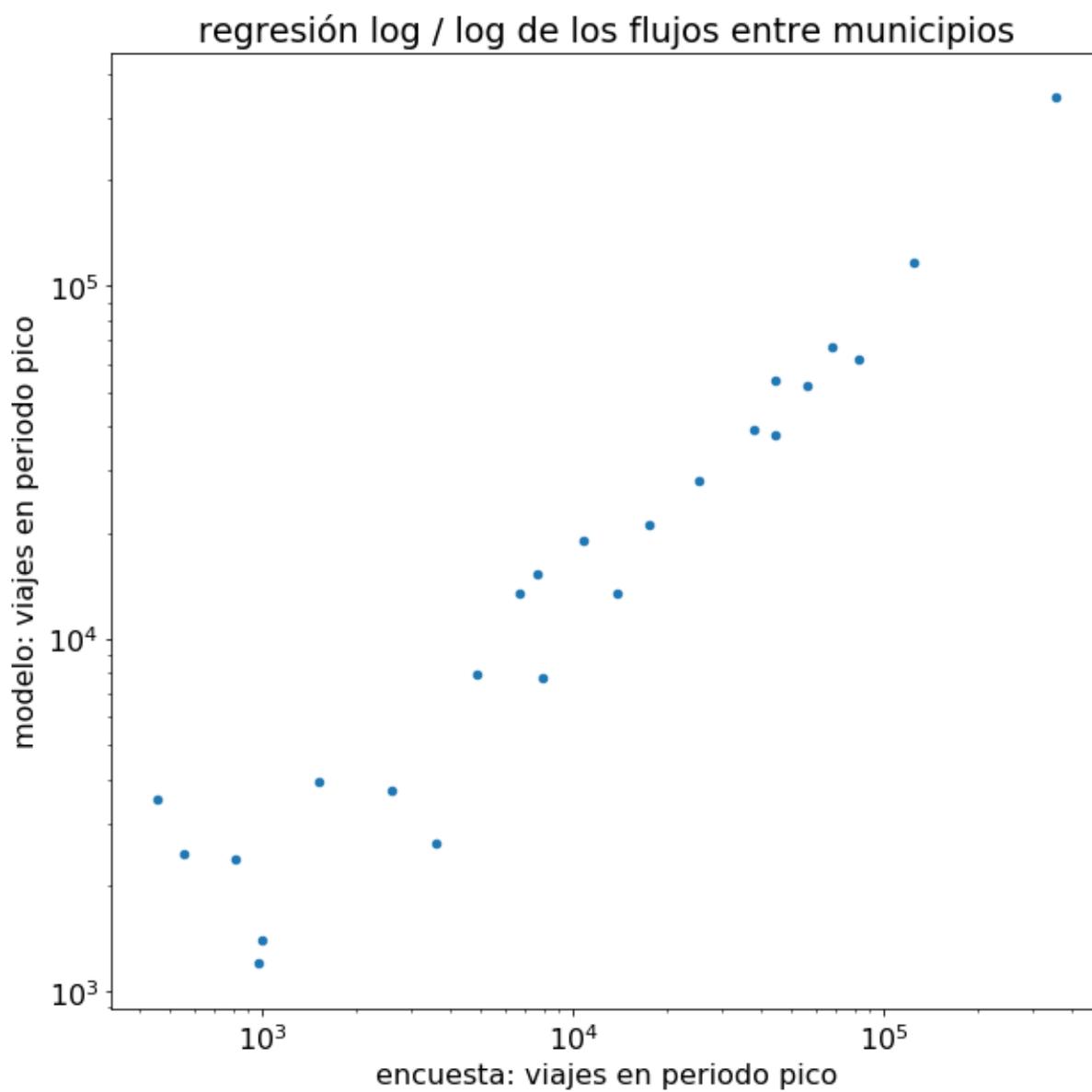


Figure 15. Calibración de los flujos entre los municipios: regresión log / log

### 1.1.4.3 Elección modal / asignación

Las etapas de elección modal y de asignación se hacen en un único procedimiento en el modelo de Santo Domingo. Es la etapa «logit». Entonces, las dos etapas clásicas se calibran simultáneamente.

Los principales **indicadores de calibración** son:

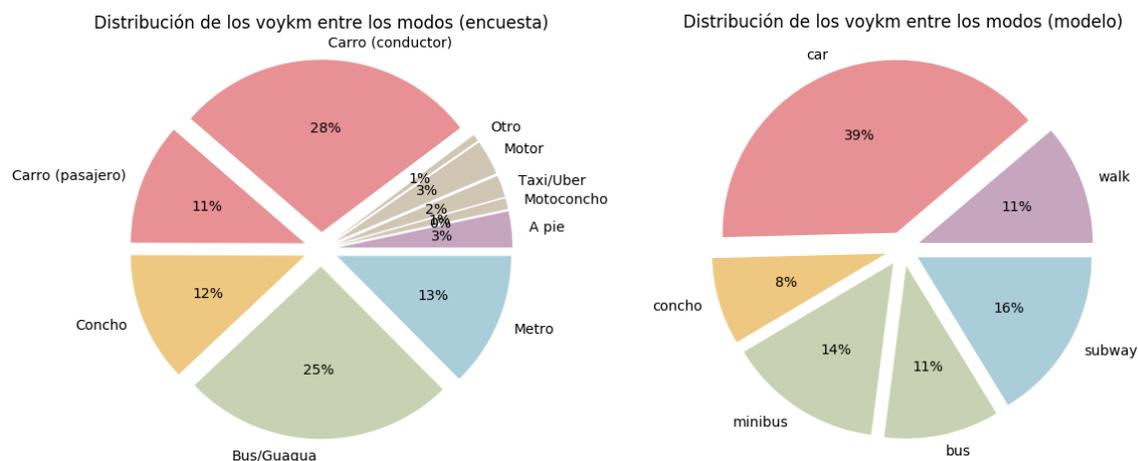
- La cuota modal con un desglose muy fine de los modos
- La carga en el metro
- El numero promedio de transferencias

Los **parámetros de calibración** son:

- La velocidad de los varios modos;
- La constante modal (percepción) de los modos;
- La percepción de las transferencias
- El valor del tiempo;
- La unidad de la función de utilidad;

Todos los parámetros se inicializan con valores de referencia, recopilados por las encuestas de preferencia declarada y los estudios de campo. Sigue un procedimiento iterativo, a través del cual se cambian los parámetros para maximizar la similitud entre los indicadores de la encuesta de movilidad y los resultados de la asignación.

Finalmente, **se ha conseguido reproducir las cuotas modales de la encuesta**. La comparación de la repartición modal de la encuesta con los resultados del modelo se presenta abajo:



**Figure 16. Cuota modal (viajeros\*km) en la encuesta de movilidad (izquierda) y en el modelo (derecha)**

Los taxis, moto-conchos, Uber etc. No se modelizan formalmente en el modelo. Sin embargo, la velocidad de los conectores peatonales aumenta con su longitud para modelizar estas opciones de las personas que no tienen un carro. Es probable que la demanda taxi, motor, y moto-concho sea asignada en itinerarios peatonales por el modelo. De aquí la cuota modal muy alta del modo «a pie» en el modelo.

En resumen, la distribución de la distancia de los desplazamientos, los flujos entre los municipios y la cuota modal general corresponden bien a la encuesta de movilidad. Son los indicadores que se escogieron para **garantizar la pertinencia del modelo al nivel estratégico**. Con vistas a mejoras del mismo modelo en el futuro, y para aclarar su área de validez, cabe destacar sus límites principales.

### 1.1.5 Suposiciones y límites principales

Los modelos se basan en hipótesis para representar la realidad de manera simplificada. El juego de suposiciones que se hacen, junto con el plan de calibración definen el área de pertinencia del modelo.

#### 1.1.5.1 Límites de calibración

**La calibración es válida con una escala geográfica metropolitana:** garantiza una buena confianza en los flujos entre los municipios y en los modos estructurantes. Sin embargo, al nivel de los sectores y barrios poblados, al nivel de las líneas alimentadoras o de la red secundaria los resultados sufren una incertidumbre alta. Si uno quiere usar el modelo a este nivel, hay que usar una zonificación idónea y calibrar los flujos en los corredores de interés con conteos en línea de pantalla.

**La calibración modal es válida para la competencia entre 4 clase de modos**

- carro
- metro-cable-brt
- bus-concho-minibus
- a pie.

Pero la competencia interna entre los varios modos de cada clase, que tienen velocidades y frecuencias parecidas sufre más incertidumbre.

#### 1.1.5.2 Hipótesis fuertes y simplificaciones

El módulo «**transporte individual**» del modelo es menos desarrollado que el módulo «transporte en común»:

- Se utiliza la red de OpenStreetMap **sin restricción de capacidad**:
- Para reproducir los efectos de congestión, se considera una velocidad «en carga» en toda la red: **esta velocidad es la misma en todas las vías**: 15kmh por hora en la situación de referencia
- No incluye el aumento de la posesión de carros en los escenarios futuros;

También cabe mencionar unas hipótesis del módulo de **transporte en común (TC)**:

- No hay restricción de capacidad (esta hipótesis es muy corriente en los modelos TC);
- Todas las líneas de un modo tienen la misma velocidad.

### 1.1.6 Conclusión

Finalmente, la herramienta así desarrollada es un modelo estratégico enfocado en los transportes en común. Sirve bien los objetivos del PMUS. Al contrario, no es adecuado para estudios más avanzados, que requieren datos de entrada y de calibración con una mejor precisión geográfica.

