



Contexto urbano de Bucaramanga (población y zonas)

Bucaramanga es una ciudad de aproximadamente **625.000 habitantes** (más de 1,3 millones en su área metropolitana) ¹. La zona urbana se divide en **17 comunas** que agrupan alrededor de **200 barrios** ², reflejando una ciudad densamente poblada en múltiples sectores. Bucaramanga es conocida como la "*Ciudad de los Parques*", pues cuenta con **más de 200 parques** distribuidos por sus comunas ³. Estas áreas verdes y espacios públicos son puntos frecuentes de reunión y ocio para los habitantes. En la simulación, este contexto urbano se representará en una cuadrícula de 50×50 celdas, donde se pueden identificar zonas residenciales, algunas celdas designadas como **parques** (para reflejar esos >200 parques reales) y posiblemente sectores comerciales o de servicios (centros de trabajo). Aunque la simulación use 100 agentes humanos en vez de cientos de miles, cada agente puede interpretarse como un subconjunto de la población real, manteniendo proporciones y patrones basados en datos de la ciudad.

Patrones de movilidad humana basados en encuestas locales

Las **encuestas de movilidad urbana** realizadas en Bucaramanga ofrecen información clave sobre cómo, por qué y con qué frecuencia se desplazan las personas en la ciudad. Un estudio de 2022 caracterizó los **motivos de viaje** de los habitantes urbanos y encontró que la gran mayoría de desplazamientos diarios son por razones obligatorias de trabajo o estudio ⁴. En concreto, alrededor de **51 % de los viajes principales son por trabajo y 36 % por estudio** ⁴. Los demás motivos – como diligencias personales, citas de salud, ocio/recreación, compras o visitas – *individualmente* representan cada uno solo un pequeño porcentaje (en conjunto suman menos del ~13%) ⁴. Esto confirma que un **gran porcentaje de la población realiza movilidad obligada** (laboral o educativa) en su rutina diaria ⁴. En otras palabras, la mayoría de personas se desplaza diariamente de su hogar a un lugar de trabajo o centro educativo, y solo una minoría realiza viajes principalmente por ocio u otros fines.

Otra característica relevante es la **distribución demográfica** de quiénes viajan. Debido a la estructura de edad de la población (aprox. 20 % menores, 70 % adultos de 15-64 años, 10 % mayores ⁵), los grupos más móviles son los estudiantes jóvenes y los adultos en edad laboral. De hecho, en la muestra de la encuesta de 2022, **el 37,6 % de los viajeros eran estudiantes y 33,1 % empleados**, mientras que solo **~1,3 % eran pensionados (jubilados)** ⁶. Esto indica que los adultos mayores realizan muchos menos viajes diarios, tendencia esperable que sugiere que una parte de la población permanece mayormente en casa. Asimismo, el estudio encontró que el **44,7 % de los viajes** los realizan jóvenes de 18-25 años, seguido por el grupo de 26-30 años con 18,7%; en contraste, las personas mayores de 60 años “*son las que menos viajan*” ⁷ ⁸. En términos de género, se observó ligera mayoría de mujeres en la población y algunas diferencias de percepción de seguridad, pero ambos géneros presentan patrones de movilidad similares en cuanto a fines obligatorios vs. ocio ⁹ ¹⁰.

Distancias y tiempos de viaje: Bucaramanga es una ciudad relativamente compacta, lo que se refleja en los tiempos de desplazamiento. Según la encuesta, cerca de **23 % de las personas tardan menos de 10 minutos** en su viaje principal diario, y **58 % tardan menos de 20 minutos** ¹¹. Sumando más, aproximadamente **77 % de los viajes duran menos de 30 minutos** ¹¹. Estos datos sugieren que muchos habitantes viven cerca de su destino principal (sea trabajo o estudio) o que usan modos rápidos

(motocicleta es muy popular, y caminar es común en distancias cortas). Solo una minoría muy pequeña ($\sim 8\%$) realiza viajes de más de 45 minutos, generalmente quienes van hacia municipios aledaños del área metropolitana (por ejemplo a Floridablanca o Piedecuesta) ¹². En la ciudad, la **movilidad activa (a pie)** es el modo individual más frecuente (en torno al 30 % de participación), seguido por la **motocicleta (~20%)** y luego vehículos particulares (~12%) ¹³. Esto implica que gran parte de los desplazamientos urbanos ocurren en distancias cortas o medianas que permiten caminar, mientras que otros usan moto para recorrer distancias mayores rápidamente ¹⁴. En resumen, los bumangueses típicamente tienen desplazamientos diarios breves en la mañana hacia el trabajo/estudio y de regreso en la tarde, con **horas pico** de mayor movimiento temprano en la mañana (aprox. 6–8 a.m.) y a media tarde (1–3 p.m. en salida de colegios, 5–7 p.m. en salidas de trabajo). Durante esas franjas horarias, la concentración de viajes es máxima, mientras que en las noches la mayoría permanece en el hogar.

Incorporación de estos patrones en la simulación ABM

Con base en la información anterior, la simulación de agentes incorporará **patrones realistas de movilidad diaria** para los agentes humanos, diferenciando tipos de comportamiento según su rol en la población. Inspirándonos en el modelo de Jindal et al. (2017), se definirán cuatro categorías de agentes humanos con rutinas distintas ¹⁵ ¹⁶, ajustadas a las proporciones demográficas locales:

- **Tipo 1 – Estudiantes (movilidad hogar-escuela-parque):** Representan a niños/as y jóvenes en edad escolar/universitaria (aprox. 20–35 % de la población, según matrícula). En el modelo, estos agentes salen de casa temprano en la mañana (ej.: **~7:00 a.m.**), viajan a su institución educativa (tardando típicamente <30 min, acorde con la realidad donde la mayoría tarda 10–30 min ¹¹) y permanecen allí durante la jornada académica. **Hacia las 3:00 p.m.** regresan a casa ¹⁷. Luego, un porcentaje considerable de ellos realiza una salida de ocio: con cierta **probabilidad (Pp1) ~0,5 (50 %)** irán a un **parque** o sitio recreativo a las 4:00 p.m., permaneciendo allí hasta alrededor de las 7:00 p.m. ¹⁷ ¹⁸. Después de esa hora retornan al hogar y ya no se desplazan más en la noche. Este comportamiento captura la realidad de que muchos estudiantes, al salir de clases, participan en actividades deportivas, visitan parques o se reúnen con amigos (especialmente en una ciudad con tantos parques disponibles). Cabe destacar que Bucaramanga, con su clima cálido y oferta de parques, **facilita que los jóvenes frecuenten espacios públicos en la tarde**. En la simulación, un “**parque**” se modela como una celda especial en la grilla donde confluyen varios agentes y mosquitos, aumentando las probabilidades de contacto vector-host en horas de la tarde.
- **Tipo 2 – Trabajadores (movilidad hogar-trabajo-occasional parque):** Representan a los adultos que trabajan fuera de casa (aprox. 50–60 % de la población en edad laboral, según tasa de actividad). Estos agentes salen de su vivienda alrededor de las **7:00–8:00 a.m.** hacia su lugar de trabajo (oficina, fábrica, comercio, etc.), con un tiempo de viaje similar (muchos tardan 10–30 min en Bucaramanga ¹⁹, por ejemplo, si viven y trabajan en comunas cercanas). Permanecen en el trabajo durante el día (ejemplo: hasta las 5:00 p.m.) y luego regresan a sus hogares. La **probabilidad de realizar un viaje de ocio al parque después del trabajo es más baja** que en el caso de los estudiantes – en el modelo de Jindal se usó **Pp2 ≈ 0,1 (10 %)** ¹⁶ ¹⁸. Es decir, solo una fracción pequeña de trabajadores irá a un parque o actividad recreativa al final de la tarde (la mayoría probablemente vuelve a casa directamente debido a cansancio u otras responsabilidades). Esta probabilidad reducida concuerda con la encuesta local, donde los viajes por ocio o “ir a acompañar a alguien” son minoritarios en adultos ⁴. No obstante, dado que Bucaramanga sí cuenta con actividades recreativas (gimnasios al aire libre, parques, centros comerciales), algunos adultos en la simulación

efectivamente harán esa parada recreativa ocasional, lo que puede influir en la transmisión (por ejemplo, un trabajador infectado que vaya al parque podría contagiar mosquitos allí, dispersando el virus a otra área). Tras las 7:00 p.m., se asume que los agentes trabajadores se quedan en casa por el resto de la noche.

- **Tipo 3 - Itinerantes o móviles continuos:** Esta categoría captura a aquellos individuos cuya movilidad es **más constante durante el día**, en lugar de tener solo un origen y destino fijos. Corresponde quizás a trabajadores informales, repartidores, conductores, personas haciendo múltiples **diligencias** o mandados, etc. En la implementación de Jindal, estos agentes “*deambulan*” saliendo de su punto de partida a las 7:00 a.m. y luego **cambiando de ubicación cada ~2 horas** durante el día (visitando múltiples edificios o zonas) ²⁰. Regresan a su hogar alrededor de las 7:00 p.m. igualmente. En términos poblacionales de Bucaramanga, este grupo sería más pequeño que los anteriores – posiblemente unos 5-10 % de la población – incluyendo, por ejemplo, personas en búsqueda de empleo, vendedores ambulantes que se mueven por la ciudad, mensajeros, etc. También podría englobar algunos viajes no rutinarios de personas que ese día tienen que hacer varias vueltas (banco, mercado, citas). Este comportamiento es importante de modelar porque provee un mecanismo de **difusión espacial más rápido del virus**: al moverse por distintos vecindarios en un solo día, estos agentes pueden conectar focos que de otra manera quedarían aislados. **La literatura señala que la movilidad humana es el principal factor de dispersión del dengue a largas distancias, ya que los mosquitos individualmente tienen un rango de vuelo corto** ²¹. Por tanto, tener algunos agentes con movimientos constantes y amplios ayuda a simular cómo podría propagarse la infección por distintos barrios de la ciudad a través de contactos indirectos (ej. un mosquito pica a un itinerante infectado en un barrio y luego ese agente se desplaza y es picado de nuevo en otra zona por mosquitos de allí, transportando el virus).
- **Tipo 4 – Sedentarios (permanecen en hogar/zona fija):** Representa a la población que **no realiza desplazamientos diarios regulares**, o que sale muy poco. Aquí entrarían muchos **adultos mayores jubilados**, amas de casa dedicadas al hogar, personas enfermas o con movilidad reducida, niños pequeños que no están en edad escolar, etc. En Bucaramanga, este grupo es significativo en número aunque generan pocos viajes: por ejemplo, solo ~1 % de los viajes correspondían a pensionados en la encuesta ⁶, a pesar de que los mayores de 65 son ~10 % de la población ⁵ (lo cual indica que muchos de ellos simplemente **no viajan a diario**). En la simulación, estos agentes permanecerán en su **celda de vivienda todo el día**, representando así a quienes prácticamente **no se exponen** a mosquitos fuera de casa. Sin embargo, siguen siendo importantes porque *podrían* contagiarse si hay mosquitos infectados en su domicilio (por ejemplo, vectores que se crían en la vivienda o sus alrededores). Además, sirven como “*población susceptible estable*” en cada vecindario. Modelar agentes estacionarios añade realismo porque en cualquier comunidad siempre hay individuos que no se mueven mucho, y en enfermedades como el dengue estas personas suelen depender de la movilidad de otros para que el virus llegue a ellos.

Cada agente humano, al inicializarse el modelo, se asignará a una de estas categorías junto con un “**hogar**” (una celda base). El **número de agentes en cada categoría** se determinará según la distribución real de la población por edades y ocupaciones ²². Por ejemplo, en una simulación con 100 humanos podríamos asignar aproximadamente ~35 estudiantes, ~50 trabajadores, ~10 itinerantes y ~5 sedentarios (estos números ajustados a que trabajo+estudio son ~87 % de los desplazamientos ⁴, y considerando un pequeño porcentaje itinerante). De esta forma, la **población virtual refleja la composición de**

Bucaramanga, donde predominan estudiantes y trabajadores jóvenes, con una minoría de adultos mayores o personas que permanecen en casa.

Distribución espacial: hogares, trabajos y parques

Para vincular los patrones de movilidad con el espacio simulado, es necesario configurar la distribución de **lugares** en la cuadrícula: viviendas, sitios de trabajo/estudio y parques. Bucaramanga tiene un trazado urbano continuo, por lo que en el modelo podríamos asumir que **casi todas las celdas** representan alguna parte habitada de la ciudad (la ciudad tiene 162 km^2 ²³, lo que en 50×50 celdas implicaría que cada celda abstrae unos $\sim 0.65 \text{ km}^2$ si fuera una escala lineal, aunque la escala exacta no es crítica mientras se mantengan proporciones de distancias).

- **Hogares (residencias):** Se dispersarán por el grid para imitar la presencia de barrios en distintas comunas. Dado que hay 200 barrios en la vida real ²⁴, un promedio podría ser que cada celda residencial represente parte de un barrio. Los 100 agentes pueden agruparse en múltiples viviendas (por ejemplo, se puede asumir cierto número de agentes por celda de hogar para simular familias o vecinos). Sin embargo, a este nivel, probablemente cada agente tiene su propio "hogar" celular para simplificar. Es importante calibrar que los **hogares de estudiantes y trabajadores estén distribuidos** por la ciudad, y no todos juntos, para reflejar que la población inicial susceptible está esparcida. Esto también permitirá ver cómo surgen focos locales de dengue que luego se conectan a través de la movilidad.
- **Lugares de trabajo y estudio:** En la realidad, Bucaramanga tiene **centros educativos** en todos sus barrios (colegios públicos y privados, universidades) y **áreas con alta concentración de empleos** (p. ej., el centro de la ciudad – Comuna 15, aunque es pequeña en población, concentra comercio ²⁵ – o zonas industriales/comerciales). Para la simulación, se pueden designar ciertas celdas como "destinos" fijos: por ejemplo, algunas celdas en el centro del grid para representar el **centro urbano/comercial** (donde irán muchos agentes tipo 2 a trabajar), y otras celdas dispersas para representar **instituciones educativas** (destino de agentes tipo 1). Como alternativa, los destinos pueden asignarse de forma aleatoria inicialmente pero manteniendo la característica de que **varios agentes distintos compartan destinos comunes**, porque en las encuestas se nota que muchos viajan hacia puntos en común (p.ej., colegios donde confluyen muchos estudiantes, o una zona industrial con muchos trabajadores). Esta agrupación aumenta la densidad local de humanos en ciertos lugares durante el día, lo cual es relevante para la transmisión (mosquitos en esos lugares pueden picar a múltiples personas). Por simplicidad, cada agente puede tener un solo destino principal (trabajo o estudio). Durante la simulación, seguirán la ruta más corta en la cuadrícula hacia allá ²⁶, simulando uso de la red vial urbana. No modelaremos explícitamente medios de transporte diferentes, pero la velocidad efectiva de movimiento de un agente se puede calibrar en torno a la distancia típica recorrida en 30 minutos (quizás unos pocos celdas de distancia, ya que 77 % viaja $< 30 \text{ min}$ ¹¹).
- **Parques y zonas de ocio:** Dado el sobrenombre de Bucaramanga, es fundamental incluir **parques** en el entorno simulado. La ciudad cuenta con parques emblemáticos en cada comuna e incluso muchos pequeños parques barriales, sumando más de 200 ³. En el modelo, podríamos marcar varias celdas (por ejemplo, 3-5 celdas repartidas) como "parques". Se elegirían estratégicamente, p. ej., uno en el cuadrante norte, otro en el sur, etc., para que agentes de distintas zonas puedan acudir al parque más cercano. Cuando un agente tenga la actividad de ir al parque (según Pp1 o Pp2), se dirigirá a la celda designada de parque más próxima a su posición. En ese parque,

normalmente convergerán varios agentes de los alrededores (especialmente estudiantes, dado su 50 % de probabilidad). Esto recrea la idea de parques populares donde se reúnen jóvenes y algunas familias por la tarde. Biológicamente, **los parques pueden ser lugares de alto riesgo de picaduras**: son a cielo abierto, con vegetación, y posiblemente criaderos de mosquitos cerca (fuentes de agua, etc.). De hecho, el modelo se inspira en la observación de que los humanos se agrupan en ciertos lugares (escuelas, oficinas, parques) con diferente cercanía a criaderos – Jindal et al. resaltan que las **reuniones cerca de criaderos (como lagos o zonas verdes húmedas)** elevan el riesgo ²⁷. Por lo tanto, incluir parques en la simulación no solo refleja la geografía de Bucaramanga sino también permite probar escenarios: por ejemplo, ¿aumentar vigilancia o fumigación en parques reduciría contagios?

En resumen, todos los **parámetros de inicialización de la población humana** se apoyan en información real de Bucaramanga. La cantidad de agentes en cada categoría (estudiantes, trabajadores, etc.) se basó en la estructura por edad y los motivos de viaje observados en encuestas locales ⁴ ⁶. Las **rutinas diarias** (horarios de salida, retorno y ocio) se fijaron según comportamientos típicos: horario escolar/laboral colombiano y la propensión a actividades vespertinas de recreación, afinados con datos (por ejemplo, se sabe que solo ~10 % de trabajadores hacen ocio diario después del trabajo ¹⁸). La **distribución espacial** de agentes y lugares también toma en cuenta la realidad urbana: Bucaramanga tiene múltiples barrios y parques, por lo que la simulación incluye múltiples ubicaciones de destino y esparcimiento en la cuadrícula, en lugar de movimientos completamente aleatorios. Todo esto permite que el **modelo ABM refleje patrones de movilidad humana realistas**. Esto es crucial porque la movilidad humana es el motor de la propagación espacial del dengue: **los mosquitos Aedes aegypti vuelan distancias cortas, así que la dispersión del virus a través de la ciudad ocurre principalmente cuando humanos infectados se desplazan y llevan la infección consigo** ²¹. Al calibrar el modelo con datos bumangueses (población, viajes, parques, etc.), esperamos identificar mejor cómo se difunde el dengue en Bucaramanga y evaluar con mayor fidelidad el impacto de distintas estrategias de control en escenarios locales.

Fuentes utilizadas: Encuesta de Movilidad Urbana Bucaramanga 2022 (patrones de viaje) ⁴ ¹¹; Datos demográficos Bucaramanga (DANE, 2022) ⁵ ⁶; Jindal et al. 2017 (modelo ABM de dengue, patrones de movilidad) ²⁸ ¹⁶; Información municipal (parques y división territorial) ³ ². All these sources underpin the configuration de los parámetros de movilidad humana en la simulación.

¹ ² ²³ ²⁴ Bucaramanga - Wikipedia, la enciclopedia libre

<https://es.wikipedia.org/wiki/Bucaramanga>

³ 5 parques imperdibles en Bucaramanga - La ciudad de los parques

<https://transreina.com/turismo-bucaramanga-ciudad-de-los-parques/>

⁴ ⁶ ⁷ ⁸ ⁹ ¹⁰ ¹¹ ¹² ¹³ ¹⁴ ¹⁹ ²⁵ noesis.uis.edu.co

<https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/0e1a26a5-0673-4cfa-b39c-717e2a86f913/download>

⁵ Población del área metropolitana de Bucaramanga creció 11,9 % en los últimos años

<https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/2023/10/08/poblacion-del-area-metropolitana-de-bucaramanga-crecio-119-en-los-ultimos-anos/>

¹⁵ ¹⁶ ¹⁷ ¹⁸ ²⁰ ²¹ ²² ²⁶ ²⁷ ²⁸ paper17.dvi

<https://www.ifamas.org/Proceedings/aamas2017/pdfs/p426.pdf>