

# TECNOLOGÍA CÍVICA

para mejorar  
la calidad del aire  
en ciudades

---

## **Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo**

Tecnología cívica para mejorar calidad del aire en ciudades / Carolina Piedrafita, Antonio Vázquez Brust, María de los Ángeles Scetta, Roberto Madera.

p. cm. — (Monografía del BID ; 1199)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Air quality-Colombia. 2. Air quality-Ecuador. 3. Air quality-Peru. 4. Transportation-Environmental aspects-Colombia. 5. Transportation-Environmental aspects-Ecuador. 6. Transportation-Environmental aspects-Peru. 7. Environmental innovations. I. Piedrafita, Carolina. II. Vázquez Brust, Antonio. III. Scetta, María de los Ángeles. IV. Madera, Roberto. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Vivienda y Desarrollo Urbano. VI. Serie.  
IDB-MG-1199

**Jel codes: Q53, Q56, Q58, I15**

**Keywords: tecnología cívica, datos cívicos, código abierto, innovación, piloto, calidad del aire, contaminación, emisiones, salud, transporte, movilidad.**

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



**Autores:**

**Carolina Piedrafita<sup>1</sup>**

**María de los Angeles Scetta<sup>1</sup>**

**Antonio Vazquez Brust<sup>1</sup>**

**Roberto Madera Arends<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratorio de Ciudades, División de Vivienda y Desarrollo Urbano, Banco Interamericano de Desarrollo.*

Con especial agradecimiento por sus aportes a Washington Fajardo, Enrique Peláez y Elisabeth Arnold (Laboratorio de Ciudades, HUD-BID), a Pablo Ordoñez (SPD-BID), a María Rosa Muñoz y Grace López (SOLUTIONSplus), a Paloma Acevedo (HUD-BID, Ecuador) y a María Carolina Castillo (Probogotá Región), Camilo Benavides, Javier Vega y Alberto Uribe (desarrolladores técnicos BID-Probogotá Región).

# TABLA DE CONTENIDOS

## CAPÍTULO 1

## CAPÍTULO 2

<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Introducción</b>	<b>9</b>
<b>Piloto en Lima, Perú - Proyecto “Respira Limpio”</b>	<b>14</b>
Problemática detectada	15
Objetivos y alcance	16
Producto final y resultados obtenidos	20
Escalabilidad y replicabilidad del piloto en otras ciudades de la región	23
<b>Piloto en Quito, Ecuador - Proyecto “Movilidad Urbana y Electrificación Sostenible”</b>	<b>24</b>
Problemática detectada	25
Descripción del piloto: Objetivos y alcance	26
Descripción y resultados de las fases	31
Escalabilidad y replicabilidad del piloto en otras ciudades de la región	36

## **CAPÍTULO 3**

### **Piloto en Bogotá, Colombia - Proyecto “Transporte Limpio” 38**

Problemática detectada 39

Descripción del piloto: Objetivos y alcance 40

Descripción y resultados de las fases 41

Escalabilidad y replicabilidad del piloto en otras ciudades de la región 50

## **CAPÍTULO 4**

### **Epílogo 51**

## FIGURAS

<b>Figura N°1:</b> Diseño de pantallas del aplicativo “Respira Limpio”	17
<b>Figura N°2:</b> Esquema general de la Inteligencia Artificial utilizada en el aplicativo “Respira Limpio”	17
<b>Figura N°3:</b> Funcionalidad de “Respira Limpio” para la elección del destino	18
<b>Figura N°4:</b> Funcionalidad de “Respira Limpio” para la generación de alertas	19
<b>Figura N°5:</b> Variación temporal de la concentración de PM2.5 registrado por el aplicativo “Respira Limpio” y el módulo móvil de un recorrido con perfil ciclista	22
<b>Figura N°6:</b> Diferencia entre la ruta recomendada por el aplicativo “Respira Limpio” (modo ruteo) y la ruta alterna (modo monitor) expresado en exposición por distancia	23
<b>Figura N°7:</b> Área de implementación del proyecto piloto	27
<b>Figura N°8:</b> Ilustración de los cuatro esquemas operativos del proyecto piloto	29
<b>Figura N°9:</b> Metodología para la reconstrucción de los recorridos. Definición de recorrido, tramo, subtramo y paradas	30
<b>Figura N°10:</b> Vehículos incluidos en el proyecto piloto de electromovilidad en el CHQ	31
<b>Figura N°11:</b> Vehículos en funcionamiento en el CHQ	32
<b>Figura N°12:</b> Reconstrucción de algunos recorridos realizados por vehículos	33

## TABLAS

<b>Figura N°13:</b> Evolución diaria del PM2.5 y PM10 registrados en el CHQ por la estación fija del Municipio y por los vehículos eléctricos durante la Fase 1	35
<b>Figura N°14:</b> Vehículos a incluir en la segunda y tercera fase del proyecto	36
<b>Figura N°15:</b> Dispositivo IoT instalado en vehículos de carga	42
<b>Figura N°16:</b> Mapa de emisiones acumuladas	43
<b>Figura N°17:</b> Mapa de emisiones de un trayecto medio	43
<b>Figura N°18:</b> Diseño de las pantallas de la aplicación - Usuario Conductor	48
<b>Figura N°19:</b> Diseño de las pantallas de la aplicación - Usuario Supervisor o Administrador	49
<b>Tabla N°1:</b> Actores involucrados en el piloto de la aplicación móvil “Respira Limpio”	19
<b>Tabla N°2:</b> Concentraciones de PM2.5 por minuto registrados por el aplicativo “Respira Limpio” y el módulo móvil en uno de los recorridos de prueba del perfil peatón	21
<b>Tabla N°3:</b> Actores involucrados en el proyecto piloto de electromovilidad en el CHQ	28
<b>Tabla N°4:</b> Resultados comparativos entre esquemas de trabajo	33
<b>Tabla N°5:</b> Actores involucrados en el proyecto piloto “Transporte Limpio”	41

**Tabla N°6:** Interacciones de los conductores 46

**Tabla N°7:** Retos que pueden afrontar los supervisores y administradores 46

## RESUMEN

La presente publicación se enfoca en el uso de la tecnología cívica como una herramienta clave para abordar los desafíos de la calidad del aire en las ciudades de América Latina y el Caribe (ALC), promoviendo un ambiente más limpio y saludable para todos sus habitantes.

Desde el Laboratorio de Ciudades del BID, se ha colaborado estrechamente con gobiernos locales de ALC para identificar y ejecutar tres proyectos piloto de tecnología cívica. Los pilotos se llevaron a cabo en Lima, Bogotá y Quito. En las tres ciudades se abordó el aspecto de la movilidad urbana y el transporte. En Lima se desarrolló una aplicación móvil llamada “Respira Limpio”, que brinda al usuario (peatones o ciclistas) recomendaciones sobre rutas de baja exposición a la contaminación del aire. En Bogotá se llevó adelante el proyecto “Transporte Limpio”, que se propuso generar información para medir las emisiones generadas por el transporte de carga, y al mismo tiempo diseñar sistemas de juegos para promover prácticas de conducción más sostenibles. Por último, en Quito, se apoyó el proyecto “Movilidad Urbana y Electrificación Sostenible” que, con el objetivo de bajar las emisiones en el centro histórico de la ciudad, introduce vehículos eléctricos que mejoran la logística y conectividad de última milla.

Los tres proyectos están desarrollados en tecnología de código abierto y pueden ser replicados y adaptados en otros contextos con una baja inversión. Por lo tanto, se espera que esta publicación sirva como inspiración y motivación a otras ciudades de la región que enfrentan desafíos similares.

# Introducción

---



La contaminación del aire es un tema de creciente preocupación en todas las ciudades del mundo donde la expansión urbana, facilitada por la oferta de infraestructura vial, ha dado lugar a un aumento de las tasas de motorización, una creciente congestión vehicular y un aumento en el consumo de combustibles fósiles. Según un comunicado de la Organización de las Naciones Unidas (ONU)<sup>1</sup>, el 99% de la población del mundo respira un aire con dañinas partículas finas (PM10 y PM2.5) y de dióxido de nitrógeno (NO2) en concentraciones que superan los límites establecidos por las pautas globales de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esto supone una grave amenaza para la salud de la población dado que la exposición a niveles elevados de contaminación del aire aumenta el riesgo de enfermedades cardíacas, respiratorias y oncológicas. La OMS menciona que, cada año, alrededor de 4,2 millones de personas mueren a causa de la contaminación del aire ambiente<sup>2</sup> y otros miles de millones experimentan sus efectos perjudiciales. De acuerdo con Hanna, Hoffman, Oliva y Schneider (2021)<sup>3</sup>, los altos niveles de contaminación del aire impactan negativamente en la salud, la oferta laboral, la productividad y los resultados educativos. Sin embargo, la contaminación atmosférica pasa desapercibida en nuestras vidas diarias, ya que rara vez disponemos de datos oportunos y precisos sobre la calidad del aire que respiramos.

El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) se refiere a pequeñas partículas en el aire que pueden ser perjudiciales para la salud cuando se inhalan. El PM es un contaminante importante que puede penetrar en el sistema respiratorio, causando problemas de salud como enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Estas partículas varían en tamaño, siendo PM10 las partículas de menos de 10 micrones de diámetro y PM2.5 aún más pequeñas, de menos de 2.5 micrones. Cuanto más pequeñas son las partículas, más profundamente pueden llegar a los pulmones e incluso entrar en el torrente sanguíneo. El PM puede originarse de diversas fuentes. En las ciudades, suele provenir de sitios de construcción, chimeneas industriales y vehículos. Monitorear y controlar los niveles de PM es crucial para proteger la salud pública y el medio ambiente.

- 1 Organización de las Naciones Unidas. (ONU, 2022). El 99% de la población mundial respira aire contaminado. <https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592>
- 2 Organización Mundial de la Salud. (OMS, 2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- 3 Hanna, R., Hoffmann, B., Oliva, P., & Schneider, J. (2021). The power of perception: limitations of information in reducing air pollution exposure (Serie de documentos de trabajo del BID No. 1260). Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0003392>

En América Latina y el Caribe (ALC), la mayoría de las ciudades que recogen información sobre la calidad de su aire verifican que no cumplen con los estándares mínimos, exponiendo así la salud de más de 150 millones de personas. Es posible asumir que el total de afectados es mucho mayor, ya que los datos disponibles de las redes de monitoreo del aire, sólo cubren a un 22% de la población urbana de la región (Riojas-Rodríguez, Soares da Silva, Texcalac-Sangrador, Moreno-Banda, 2016)<sup>4</sup>.

Como señalan Hoffman y Medina Pulido (2022)<sup>5</sup>, la exposición a la contaminación del aire es un problema de salud urgente en entornos urbanos de ALC, y que además afecta desproporcionadamente a los grupos sociodemográficos desfavorecidos que generalmente se encuentran expuestos a mayores niveles de contaminación. A su vez, la evidencia señala que una mayor exposición a la contaminación se relaciona con un acceso más limitado a la atención médica de ciertos grupos sociodemográficos. Por tanto, es crucial priorizar la reducción de la contaminación del aire para mejorar la salud y la calidad de vida en las ciudades de la región y disminuir las desigualdades existentes.

El uso de vehículos de combustión es uno de los principales factores contaminantes sobre el cual los gobiernos locales tienen una influencia directa, en contraposición a otros sectores como la industria y la energía. Así mismo, las políticas que promueven la ciudad compacta, el transporte público, la movilidad activa, y otros componentes del sector transporte, también suelen ser competencias de las ciudades. En varias de sus publicaciones, la OMS menciona que estos aspectos son clave para mejorar la calidad del aire. Sin embargo, el índice de motorización<sup>6</sup>, que representa el número de vehículos nuevos por cada 1.000 habitantes, sigue en aumento en los países de la región, siendo Chile y Brasil quienes encabezan la estadística con 22,5 y 10,6 respectivamente. El incremento de la tasa de motorización, inducido por la oferta de infraestructura vial que facilita la conexión con áreas urbanas, provoca un incremento de la congestión vehicular en los centros urbanos. Varias ciudades de ALC encabezan las listas mundiales de congestión vehicular<sup>7</sup>, repercutiendo directamente en la calidad del aire y salud de la población expuesta a la contaminación.

- 
- 4 Riojas-Rodríguez, H., Soares da Silva, A., Texcalac-Sangrador, J. L., & Moreno-Banda, G. L. (2016). Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: implications for climate change. *Revista Panamericana de Salud Pública* (pp.150-159). <https://iris.paho.org/handle/10665.2/31229>
  - 5 Hoffman, B., & Medina Pulido, M. P. (2022). La desigualdad y contaminación del aire ambiente y contaminación acústica en América Latina y el Caribe. En N. Libertun (Ed.), *Ciudades inclusivas: ciudades saludables para todos* (pp. 64-74). Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0004459>
  - 6 Bloomberg Línea. (2023). Chile y Brasil, los países donde se compraron más vehículos por habitantes en 2022. <https://www.bloomberglinea.com/2023/02/16/chile-y-brasil-los-paises-donde-se-compraron-mas-vehiculos-por-habitantes-en-2022/>
  - 7 Statista. (2019). Rush hour traffic congestion index in South America in 2018, by city. <https://www.statista.com/statistics/889551/south-america-traffic-rush-hour/>

Abordar la problemática de la calidad del aire es también relevante para la mitigación del cambio climático. Adicionalmente a los problemas de salud de la población ya mencionados, está el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por la quema de combustibles fósiles. Un estudio en once ciudades de América Latina realizado por la CAF (2020)<sup>8</sup> indica que, en promedio, el 46% de la huella de carbono corresponde al sector del transporte. Esta tendencia es confirmada por un análisis del BID<sup>9</sup>, donde se revisaron los inventarios de GEI de 17 ciudades de ALC, apuntando que el sector de transporte es el que más emisiones genera, seguido del sector de la energía (Vera, Uribe, del Castillo, 2023). El mismo estudio menciona que las emisiones urbanas de ALC representaban el 55% de las emisiones regionales en el año 2000, cifra que se incrementó a 66% para el año 2015.

Las políticas públicas que buscan crear ciudades compactas y una movilidad activa -menos dependiente del transporte en automotor privado- pueden mitigar los impactos negativos de la urbanización sobre la salud y el clima. Estas políticas pueden complementarse y potenciarse con tecnología cívica que promueve el uso de datos y tecnología para mejorar la colaboración entre los ciudadanos y las entidades de gobierno. Los proyectos con tecnología cívica suelen implementar soluciones digitales gratuitas o de bajo costo, accesibles para los gobiernos subnacionales y con potencial para ser replicadas en otras ciudades y regiones.

La tecnología cívica presenta dos enfoques principales. Por un lado el de la participación, centrada en mecanismos para involucrar a los ciudadanos en el proceso de toma de decisiones en asuntos cívicos. Incluye herramientas y plataformas digitales que permiten a las personas participar en la política, votar, expresar sus opiniones, colaborar en proyectos comunitarios y participar en procesos democráticos de manera más directa y eficiente. El otro foco está puesto en los datos abiertos, con uso de tecnología para abrir datos gubernamentales y hacerlos accesibles y comprensibles para el público. La apertura de datos promueve la transparencia gubernamental y permite a ciudadanos, periodistas y organizaciones de la sociedad civil utilizar esos datos para analizar y resolver problemas, impulsar la rendición de cuentas y promover una mayor eficiencia en el gobierno. Así mismo la correcta comunicación de estos datos tiene el potencial de “tocar las conciencias” de los actores del sector del transporte, reconociendo que la forma en la que se moviliza aporta en mayor o menor medida a la congestión, contaminación del aire y huella de carbono. Esto promueve un círculo virtuoso de generación de datos por parte de la gente, que a su vez influye en el comportamiento de la misma gente.

Las soluciones que incorporan tecnología cívica también tienen el potencial de generar grandes volúmenes de datos (*o big data*) que pueden ser procesados con múltiples técnicas de ciencia de

---

8 Servicios Ambientales S.A. (2020). Serie Huellas de Ciudades. Caracas: CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1663>

9 Vera, F., Uribe, M. C., del Castillo, S. (2023). Acción climática y Acuerdo de París: el rol de las ciudades de América Latina y el Caribe. BID. <http://dx.doi.org/10.18235/0004837>

datos e inteligencia artificial para producir información nueva y valiosa en la toma de decisiones. Para aprovechar este valor es importante que los gobiernos locales estén dispuestos a explorar e incorporar estas tecnologías y enfoques, teniendo en cuenta que las decisiones y acciones que tomen hoy tendrán repercusiones en múltiples décadas por venir.

Específicamente, la tecnología cívica aplicada a la calidad del aire tiene la capacidad de promover la transparencia cerrando brechas de información al proporcionar datos detallados sobre dónde y cómo se materializan los impactos locales de la contaminación del aire. También puede cumplir un rol importante en la concientización de la sociedad, al informar y educar sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud y el medio ambiente. De acuerdo con Hanna et al. (2021), los gobiernos pueden implementar políticas para mitigar la contaminación del aire en el largo plazo, pero en el corto plazo, alertar a la población sobre la calidad del aire que respiran pueden permitir que las personas adopten nuevas conductas, reduciendo su exposición al aire contaminado.

Desde el Laboratorio de Ciudades de la División de Vivienda y Desarrollo Urbano (HUD, por sus siglas en inglés) del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), se busca explorar, implementar y evaluar soluciones innovadoras. A su vez, se pone énfasis en aprovechar los recursos disponibles, maximizar el impacto de las inversiones y facilitar la replicabilidad de las soluciones en otras ciudades de la región. En este sentido, se ha colaborado estrechamente con gobiernos locales de ALC para identificar y ejecutar tres proyectos piloto que combinan una inversión de bajo costo en tecnología con gran potencial para mejorar la situación de los ciudadanos. Estos proyectos se han desarrollado de manera colaborativa involucrando a ciudadanos, gobierno, sector privado y tercer sector, para atender necesidades identificadas por los gobiernos locales.

Los proyectos piloto se llevaron a cabo en Lima (Perú), Bogotá (Colombia) y Quito (Ecuador); las dos primeras ciudades se ubican entre las ciudades con el aire más contaminado de ALC<sup>10</sup>. En las tres ciudades se abordó, con distintas formas de aplicar tecnología cívica, el aspecto de la movilidad urbana y el transporte. La elección de esta temática se basó en que el uso de vehículos de combustión es el principal factor contaminante sobre el cual los gobiernos locales tienen una influencia directa.

En los siguientes capítulos describiremos los múltiples factores relacionados con el transporte que ejercen un impacto negativo en la calidad del aire y huella de carbono en las tres ciudades elegidas. Presentaremos el diseño de cada proyecto piloto, su escalabilidad y replicabilidad, y analizaremos cómo la tecnología cívica puede desempeñar un papel fundamental en la resolución de los desafíos planteados, contribuyendo así a promover un ambiente más limpio y saludable para todos los habitantes de estas ciudades.

---

10 Statista. (2019). Rush hour traffic congestion index in South America in 2018, by city. <https://www.statista.com/statistics/889551/south-america-traffic-rush-hour/>

## CAPÍTULO 1

# Piloto en Lima, Perú Proyecto "Respira Limpio"



## Problemática detectada

**E**n Lima, de acuerdo con información de la Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio (2019)<sup>11</sup>, los niveles de PM10 y PM2.5 exceden los valores establecidos en la normativa vigente. Los mayores niveles de material particulado PM10 se presentan en la zona sur de Lima, seguido por la zona este y norte. Mientras que en el caso de material particulado PM2.5 los mayores niveles se concentran en la zona este, seguidos de la zona sur y zona norte. De acuerdo con el mismo estudio de 2019, un incremento de concentración de PM2.5 en ciertas zonas podría deberse al mayor aporte de emisiones vehiculares, mientras que la concentración de PM10 podría estar más asociada a áreas sin pavimentar y/o deterioradas. El sector de transporte urbano, además, genera externalidades negativas con respecto al cambio climático. El inventario de GEI de la Provincia de Lima (2015), elaborado en base a la metodología del Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria (GPC), demuestra que la principal fuente de emisiones de GEI en Lima es el transporte con 6.355.530 t CO<sub>2</sub>eq (40%)<sup>12</sup>. En comparación con los resultados del inventario del 2012 que utilizó la misma metodología, las emisiones en el sector de transporte aumentaron un 18% del 2012 al 2015.

Por lo tanto, la población de Lima enfrenta una amenaza constante a su salud debido a la mala calidad del aire generada principalmente por su gran flota de vehículos de combustión. Durante el año 2022, se alcanzó una concentración promedio anual de 25.6 µg/m<sup>3</sup> de material particulado fino<sup>13</sup>, superando ampliamente el límite de 5 µg/m<sup>3</sup> recomendado en las Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire<sup>14</sup>. Esto tiene un efecto directo en la salud. Según el informe publicado por el Instituto de Política Energética de la Universidad de Chicago<sup>15</sup> en el año 2021, la contaminación del aire en Lima estaba reduciendo la expectativa de vida de sus habitantes en 4,7 años.

Un paso importante para aliviar el problema de la mala calidad del aire es monitorearlo constantemente. Los datos generados del monitoreo del aire pueden servir a las autoridades para establecer políticas de mitigación y analizar el impacto de sus intervenciones. También los ciudadanos pueden usar la información sobre la calidad del aire para conocer las amenazas a las que se exponen diariamente y evitar así un riesgo excesivo. Sin embargo, establecer redes de

11 Ministerio del Ambiente. Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa de Aire Limpio. (2019). Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao. Plan de Acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2019-2023. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>

12 Municipalidad de Lima, Universidad Científica del Sur, Enel Perú. (2023). Análisis del Potencial de Circularidad de la Ciudad de Lima. <https://www.enel.pe/content/dam/enel-pe/sostenibilidad/Análisis%20del%20Potencial%20de%20Circularidad%20de%20la%20Ciudad%20de%20Lima.pdf>

13 IQAir. (2022). Air quality index (AQI) and PM2.5 air pollution in Lima. Recuperado de <https://www.iqair.com/us/peru/lima>

14 Organización Mundial de la Salud. (OMS, 2021). Pautas para la calidad del aire. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf>

15 Energy Policy Institute at the University of Chicago (EPIC). (2021). AIR QUALITY LIFE INDEX. Annual Update, September. [https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2021/08/AQLI\\_2021-Report.EnglishGlobal.pdf](https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2021/08/AQLI_2021-Report.EnglishGlobal.pdf)



monitoreo con tecnologías tradicionales es siempre un desafío por los costos que ello implica. En Lima, por ejemplo, la red oficial de monitoreo tiene 10 estaciones para una ciudad de más de 3.000 Km<sup>2</sup>.

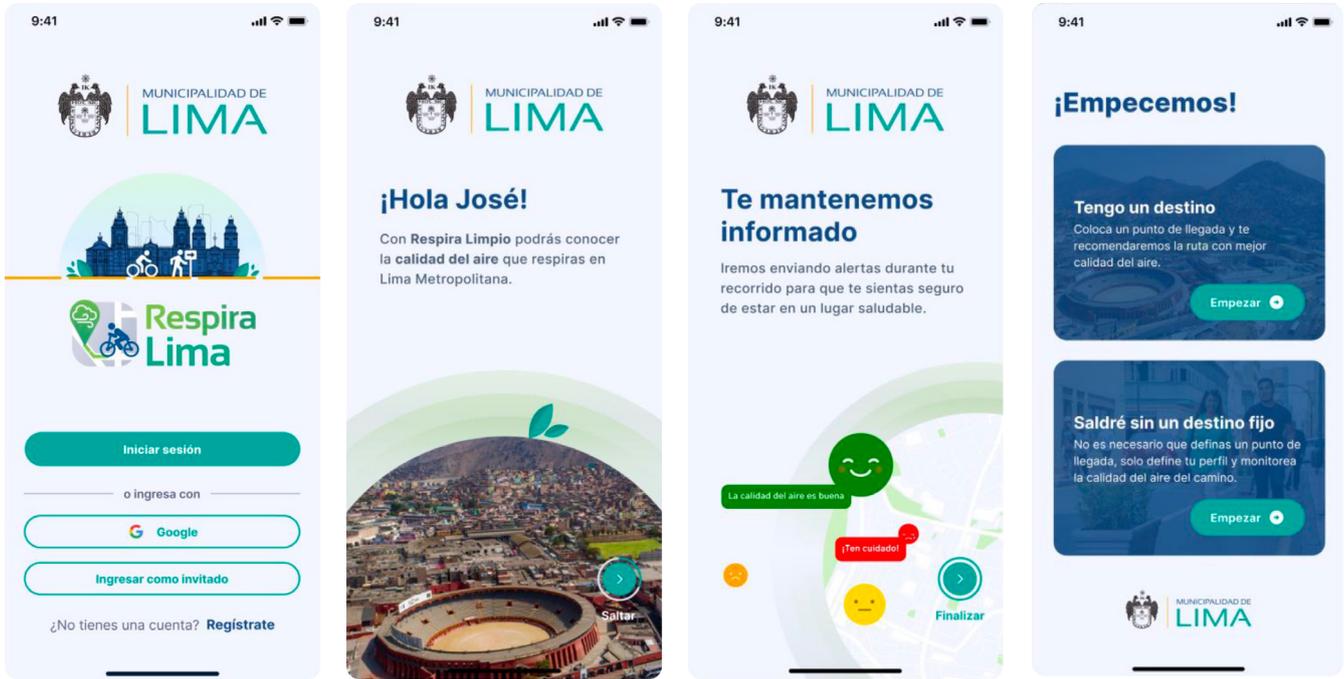
En 2020, la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML), la empresa qAIRa y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), motivadas por el deseo de mejorar la capacidad del monitoreo de la ciudad, colaboraron para desplegar la Red Local de Monitoreo de Calidad del Aire con tecnologías de medición ambiental de bajo costo, denominados sensores qHAWAX. Con esta red se incrementó de forma significativa la cantidad de puntos de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad, lo que ayudó a tener un mayor entendimiento de la distribución espacio-temporal de los contaminantes y a generar acciones rápidas a favor del ambiente y la población. Con la red instalada, el posterior desafío que tuvo que enfrentar la MML fue cómo utilizar esa información y hacerla llegar a la población general para que esté informada y pueda tomar decisiones que le permitan proteger su salud y reducir su exposición al aire contaminado.

## Objetivos y alcance

En 2022, la MML, junto a qAIRa y la PUCP, se propusieron utilizar tecnología cívica para acercar la información de calidad del aire al ciudadano de una manera interactiva y dinámica. Por ello, con el fin de facilitar el acceso a esos datos, idearon una aplicación móvil – denominada “*Respira Limpio*”– que da al usuario recomendaciones sobre rutas de movilidad urbana de baja exposición a la contaminación del aire (ver Figura N° 1). Esta iniciativa, que pudo llevarse a cabo con el apoyo del Laboratorio de Ciudades del BID, tuvo como objetivo utilizar Inteligencia Artificial para generar mapas en tiempo real a partir de la información de alta resolución de PM2.5 registrada por los sensores de la Red Local de Monitoreo de Calidad del Aire. De esta forma, se buscó promover la movilidad activa y alertar a la población sobre los niveles de aire contaminado a los que se expone al realizar sus actividades al aire libre, por lo que es especialmente útil para ciclistas y peatones.

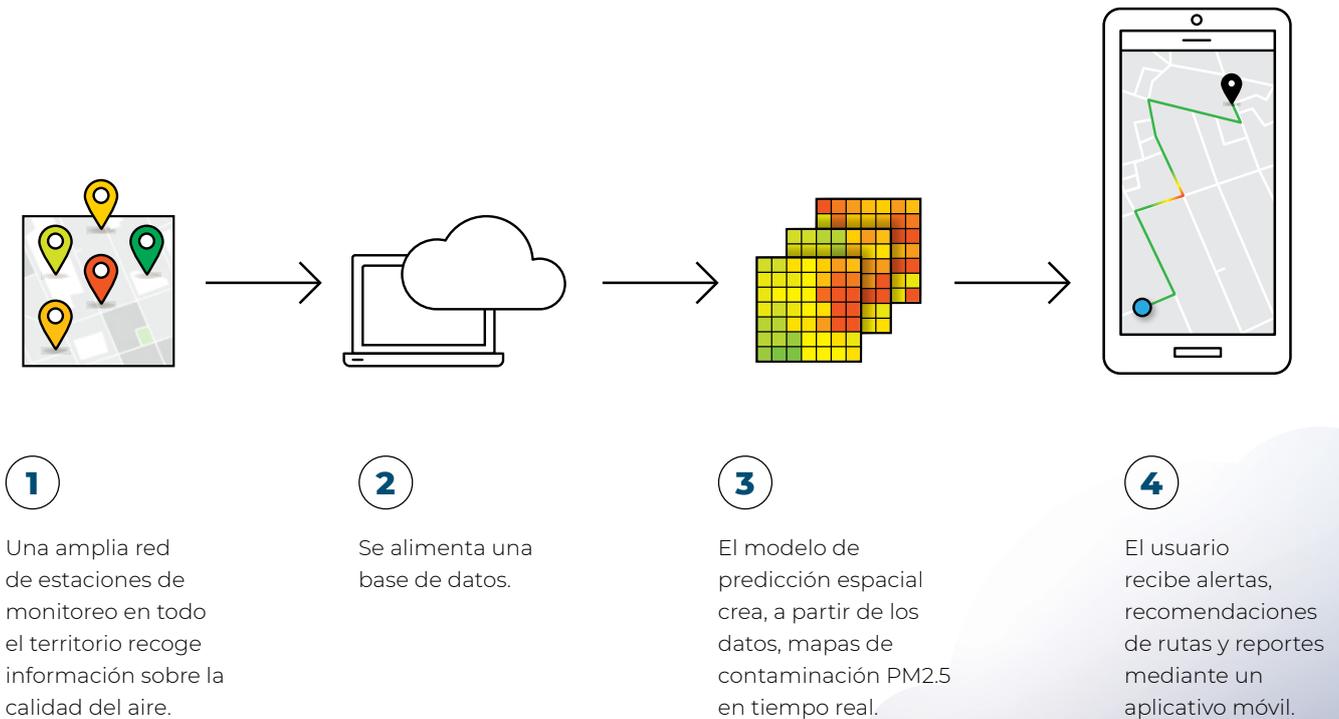


Figura N°1: Diseño de pantallas del aplicativo “Respira Limpio”



Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

Figura N°2: Esquema general de la Inteligencia Artificial utilizada en el aplicativo “Respira Limpio”



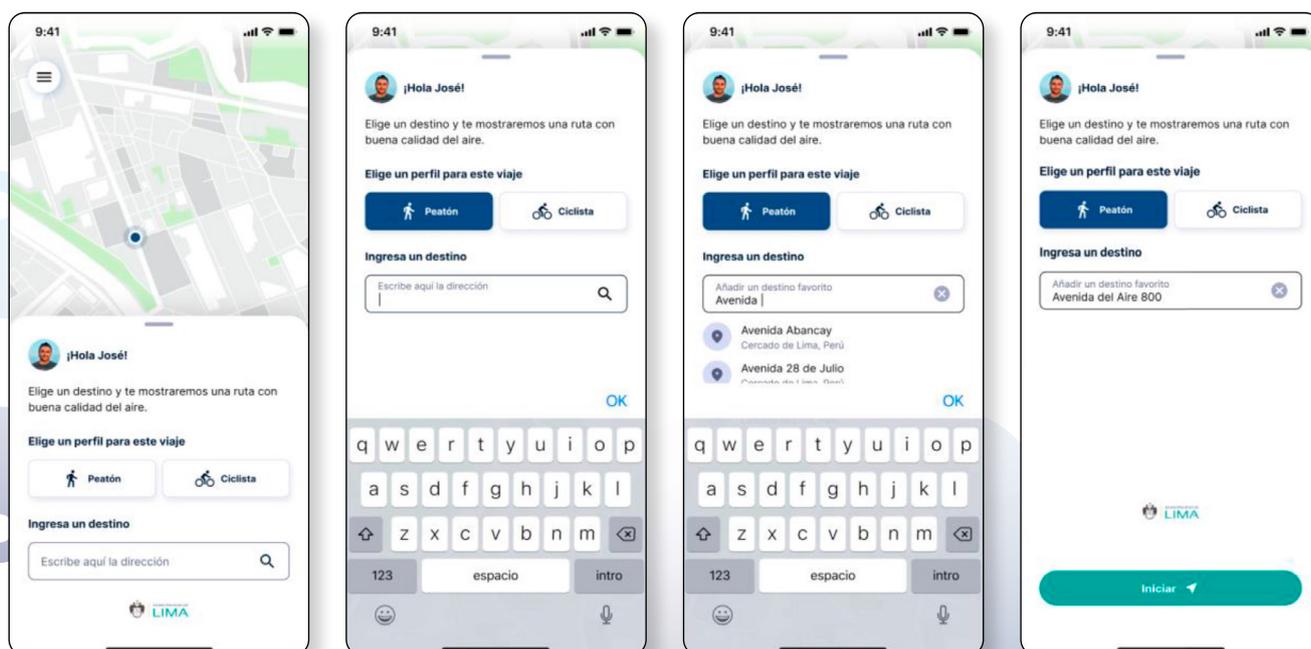
Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

El proyecto piloto “Respira Limpio” se desarrolló en el área del Cercado de Lima debido a su importancia turística y comercial, y a la alta densidad de estaciones en la zona. El aplicativo contó con un algoritmo de Inteligencia Artificial que analiza de forma continua los datos sobre material particulado fino (PM2.5). Tiene la habilidad de inferir mapas de PM2.5 en tiempo real a una resolución espacial a nivel de cuadra (100m), brindando así información precisa y actualizada (ver Figura N° 2). Se eligió el PM2.5 por su elevada presencia en la ciudad y su peligrosidad, pues este contaminante puede penetrar la barrera pulmonar y entrar al sistema sanguíneo.

La aplicación “Respira Limpio” es muy fácil de usar y puede ser instalada en prácticamente cualquier teléfono celular. A continuación se enumeran las principales funciones de la aplicación:

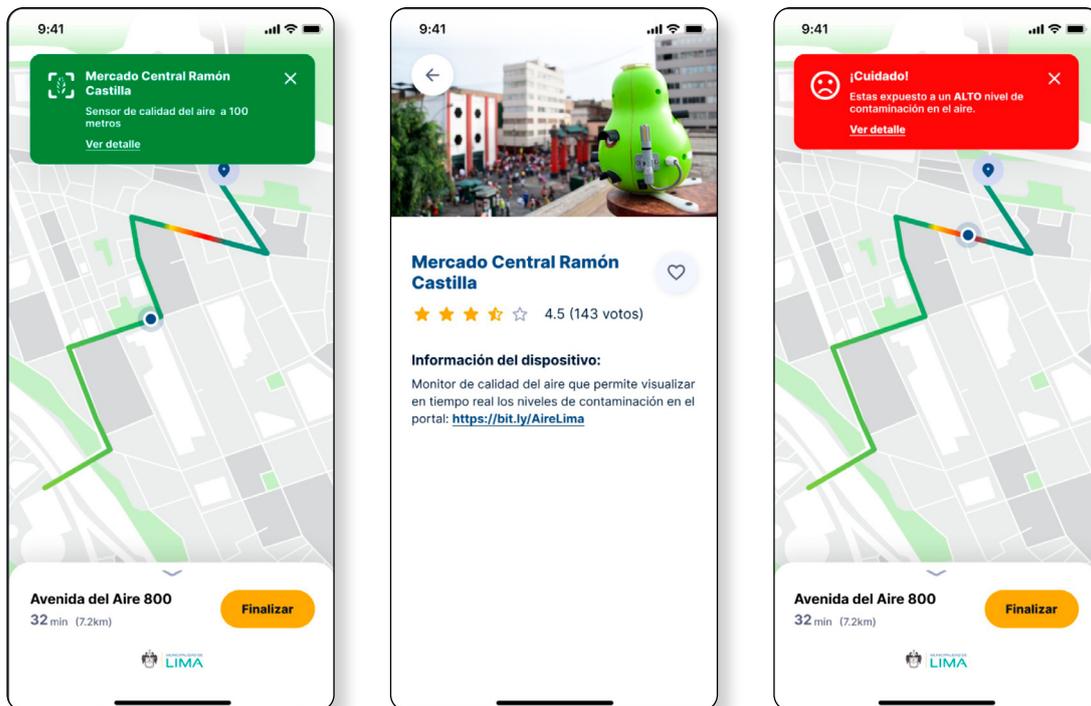
- Presenta información sobre la calidad del aire estimada del lugar donde se encuentra el usuario.
- Muestra el mapa de contaminación PM2.5 de las calles en tiempo real.
- Muestra la información de calidad del aire recogida por los sensores de la red.
- Genera recomendaciones de rutas de baja exposición desde donde se encuentra el usuario (peatón o ciclista) hasta un destino deseado y de acuerdo a su perfil (ver Figura N° 3).
- Genera reportes y alertas sobre los niveles de exposición a PM2.5 durante el recorrido en la ciudad (ver Figura N° 4).

**Figura N°3: Funcionalidad de “Respira Limpio” para la elección del destino**



Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

Figura N°4: Funcionalidad de “Respira Limpio” para la generación de alertas



Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

En cuanto al alcance, el proyecto piloto fue diseñado para llegar hasta una etapa de validación, en la que se puso a prueba la aplicación con el fin de comprender si la información que proporciona, efectivamente guía a los usuarios por las rutas con menor exposición a la contaminación del aire.

Por último, “Respira Limpio” contó con la participación de diversos actores con roles y perspectivas diferentes, que forman parte del sector privado, sector público y academia.

Tabla N°1: Actores involucrados en el piloto de la aplicación móvil “Respira Limpio”

ACTOR	DESCRIPCIÓN
Sector público	Municipio de Lima
Sector privado	Empresa qAIRA
Academia	Instituto de innovación en Productividad y Logística CATENA-USFQ, Laboratorio de Análisis de vehículos y movilidad sostenible, ModeMat-EPN.
Financiamiento	Laboratorio de Ciudades, HUD-BID.

Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. BID

## Producto final y resultados obtenidos

La aplicación "Respira Limpio" fue probada en campo para verificar la fiabilidad de su predicción de calidad del aire. Para ello se realizaron múltiples recorridos, considerando los perfiles peatón y ciclista, por distintas calles del distrito de Lima. En cada uno se midió la contaminación del aire con dos métodos en simultáneo: mediante un sensor móvil, y con la predicción estimada por el modelo de IA en el aplicativo. Para asegurar una muestra representativa se realizaron 126 recorridos efectuando la doble medición. La evaluación del ajuste de los estimados por la aplicación respecto a las mediciones del sensor se realizó mediante dos indicadores estadísticos: el coeficiente de determinación  $R^2$  y los valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Las pruebas permitieron comprobar que el modelo es capaz de generar buenas predicciones, consistentes con la medición en campo. Asimismo, por inspección de los recorridos en los cuales el ajuste entre aplicación y sensor fue bajo, se pudo determinar cuáles son los factores que pueden impedir buenos resultados. Estos son dos: el primero, la necesidad de contar con una buena cobertura de sensores fijos en la zona del viaje, ya que el modelo de IA se alimenta de estas mediciones para realizar la estimación de calidad del aire en tiempo real con alta resolución espacial. Donde no existen sensores fijos aportando datos locales, el modelo debe extrapolar con los valores disponibles en otras áreas perdiendo así precisión. El segundo obstáculo es la aparición súbita de contaminantes, que por cuestiones de velocidad de actualización -el modelo recalcula el mapa de contaminación cada 15 minutos- no haya sido reportada aún en la aplicación pero ya sea medible por el sensor móvil. Por ejemplo, si el usuario se detiene en un semáforo y la concentración de contaminantes se incrementa bruscamente por emisiones vehiculares, o por el humo de cigarrillos de transeúntes, el pico será registrado en el acto por el sensor móvil pero no influenciará la estimación del modelo hasta la siguiente de las cuatro actualizaciones por hora.

Si bien la aparición súbita de contaminantes concentrados puede ser imposible de predecir, el impacto de la ausencia de sensores fijos puede solucionarse extendiendo la red con la que cuenta la ciudad, aumentando la cobertura de áreas donde el modelo de IA es preciso. Cuando se cumplen las condiciones esperadas, las predicciones en la aplicación representan de manera muy cercana lo registrado por el sensor móvil de calidad del aire. La Tabla N° 2 muestra los resultados de uno de estos recorridos. Usando como ejemplo el perfil ciclista, la comparación de ajuste entre aplicación y sensor (Figura N°5) muestra un  $R^2$  de 0.845 y un RMSE de 2.05.

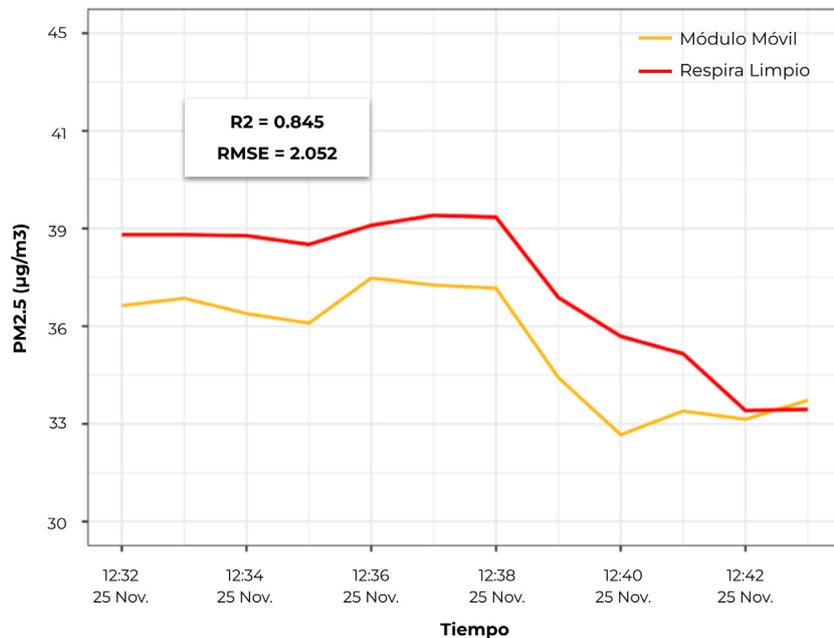
"Respira Limpio" fue probada en campo comparando la medición de contaminación del aire con un sensor móvil y las predicciones del modelo de IA. Los resultados mostraron que el modelo genera predicciones precisas y coherentes con las mediciones reales.

**Tabla N°2: Concentraciones de PM2.5 por minuto registrados por el aplicativo “Respira Limpio” y el módulo móvil en uno de los recorridos de prueba del perfil peatón**

<b>PEATÓN</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Respira Limpio (µg/m³)</b>	<b>Módulo móvil (µg/m³)</b>
21/11/2022 12:07	30.57	33.015
21/11/2022 12:08	30.57	32.985
21/11/2022 12:09	30.492	33.859
21/11/2022 12:10	30.462	34.578
21/11/2022 12:11	30.41	34.672
21/11/2022 12:12	30.4	35.044
21/11/2022 12:13	30.321	37.826
21/11/2022 12:14	30.248	36.222
21/11/2022 12:15	28.697	34.69
21/11/2022 12:16	28.552	33.743
21/11/2022 12:17	29.838	34.011
21/11/2022 12:18	29.95	33.973
21/11/2022 12:19	29.95	36.191
21/11/2022 12:20	29.959	37.386
21/11/2022 12:21	29.974	35.678
21/11/2022 12:22	29.94	35.622
21/11/2022 12:23	29.893	35.665
21/11/2022 12:24	29.848	34.817
21/11/2022 12:25	29.802	34.754
21/11/2022 12:26	29.747	33.952
21/11/2022 12:27	29.799	34.808
21/11/2022 12:28	29.81	35.713
21/11/2022 12:29	29.869	36.222
21/11/2022 12:30	29.86	36.404
21/11/2022 12:31	30.224	36.653
21/11/2022 12:32	31.455	36.741

Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

**Figura N°5: Variación temporal de la concentración de PM2.5 registrado por el aplicativo “Respira Limpio” y el módulo móvil de un recorrido con perfil ciclista**

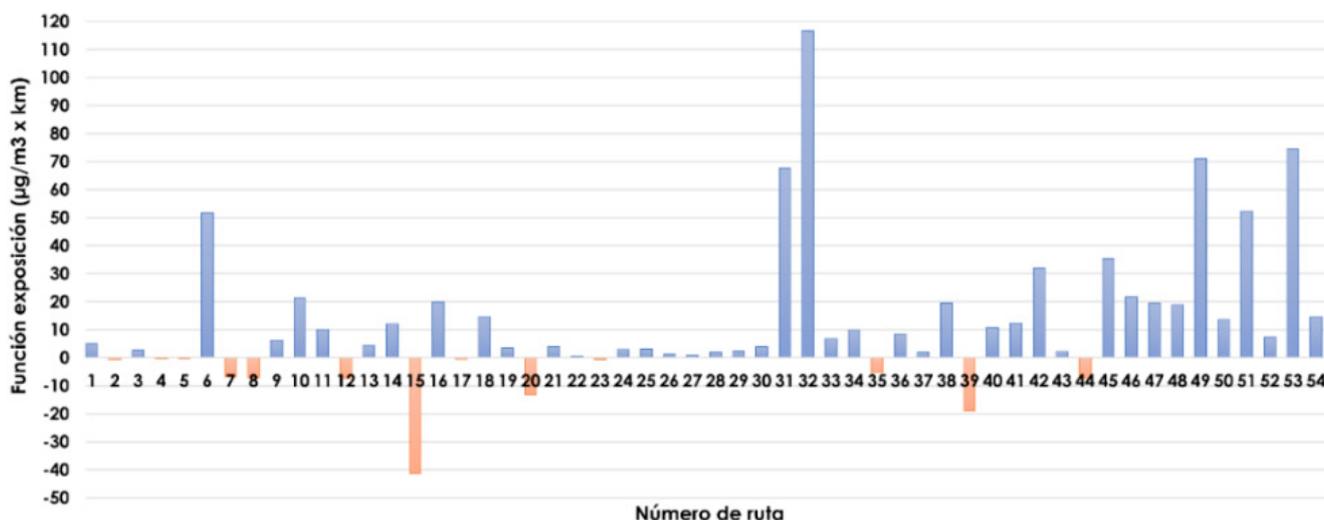


Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

Además de la calidad de las predicciones de la aplicación, se evaluó un aspecto aún más crucial: la capacidad de la aplicación de mejorar la calidad del aire al que se exponen sus usuarios. Para esto se realizaron 54 pruebas de dos personas siguiendo rutas alternas para un origen-destino común: una ruta recomendada por el aplicativo “Respira Limpio” y la otra generada como control usando otras calles para un trayecto de extensión similar. En todos los recorridos se llevó un sensor portátil para medir el grado de exposición a PM2.5 en la ruta seguida.

Los resultados mostraron que en un 76% de las veces la ruta recomendada por la aplicación “Respira Limpio” presentaba una exposición a PM2.5 significativamente menor que la ruta alternativa. La Figura N°6 muestra las mediciones. Cabe destacar que cuando se registraron diferencias negativas (barras naranjas) se debió en varios casos a condiciones fortuitas en campo; por ejemplo, la presencia de construcciones obstruyendo el paso que forzaron el desvío por otra ruta. En la mayor parte de las rutas se obtuvieron diferencias positivas (barras azules) entre lo registrado por el modo monitoreo y el modo ruteo, cumpliendo el objetivo de la aplicación: recomendar la ruta con la menor contaminación del aire.

Figura N°6: Diferencia entre la ruta recomendada por el aplicativo “Respira Limpio” (modo ruteo) y la ruta alterna (modo monitor) expresado en exposición por distancia



Fuente: Proyecto piloto “Respira Limpio”. BID.

### Escalabilidad y replicabilidad del piloto en otras ciudades de la región

La mala calidad del aire en las ciudades de ALC es un problema común, antiguo y complejo. Su solución involucra la atención de múltiples sub-problemas, tales como la mejora en el monitoreo y fiscalización ambiental, la renovación del parque automotor a tecnologías de bajas emisiones y el uso de formas de movilidad urbana más sostenibles y ecológicas.

A pesar de que queda mucho trabajo por hacer para atacar la raíz del problema, la aplicación “Respira Limpio” se diseñó para que los habitantes de Lima puedan visualizar las amenazas del aire que respiran en su día a día. Además, dado que el código de la aplicación es público, otras ciudades de la región podrían seguir el ejemplo de Lima, aprovechar el desarrollo realizado y adaptar el código para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos, permitiéndoles reducir su exposición al aire contaminado.



## CAPÍTULO 2

# Piloto en Quito, Ecuador Proyecto "Movilidad Urbana y Electrificación Sostenible"



## Problemática detectada

**E**l Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) enfrenta desafíos en cuanto a la calidad del aire debido a su ubicación en un valle rodeado de montañas, lo que limita la dispersión de contaminantes. Al ser una ciudad de altura, ubicada a 2.800 metros sobre el nivel del mar, la eficiencia de los motores de combustión interna es menor debido a la reducida cantidad de oxígeno en la atmósfera. El factor altura, sumado a la baja calidad de combustibles fósiles que se utilizan en Quito, específicamente por su alto contenido en azufre (365 ppm<sup>16</sup>), dan como resultado una mayor emisión de contaminantes de vehículos a motor. Por lo tanto, es necesario monitorear la calidad del aire y explorar alternativas para mitigar los efectos de la contaminación en la salud.

La Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito cuenta con la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), la cual monitorea la calidad del aire con nueve estaciones fijas de medición ubicadas en distintos puntos de la ciudad. Según los datos de calidad del aire reportados por la Secretaría de Ambiente de Quito en el Informe de Calidad de Vida (2022)<sup>17</sup>, solo el 22% de los días del año se reportó una calidad de aire "Deseable", mientras que 76% de los días se tuvo niveles "Aceptable", y un 2% de los días estuvo en nivel de "Precaución". A pesar de que no es el área con la peor calidad del aire de la ciudad, el Centro Histórico de Quito (CHQ) no cumple con el nivel máximo recomendado por la OMS para el parámetro PM<sub>2.5</sub><sup>18</sup>, el cual no debería superar los 5 µg/m<sup>3</sup>. Según las autoridades de la ciudad, los problemas de contaminación del aire de Quito se deben en gran medida a las emisiones vehiculares<sup>19</sup>, las cuales se intensifican en las zonas de mayor congestión. El CHQ es uno de los lugares con mayor congestión vehicular, medida indirectamente a través de la velocidad de circulación, que, según el Informe de Calidad de Vida (2023)<sup>20</sup>, es de 17 km/h, en comparación con los 26 km/h correspondiente al promedio de la ciudad. El transporte de logística y la conectividad de última milla con vehículos de combustión agravan la situación de calidad del aire. Esto se debe, en gran medida, a que la entrega de mercancías en entornos urbanos suele requerir múltiples paradas en ubicaciones cercanas, incrementando la congestión, consumo de combustible y, en consecuencia, a una mayor emisión de contaminantes

16 Moreno, B., & Del Castillo, D. (2022). Análisis del contenido de azufre en la gasolina ecuatoriana y su incidencia en las emisiones contaminantes. [https://www.researchgate.net/publication/358834216\\_Analisis\\_del\\_contenido\\_de\\_azufre\\_en\\_la\\_gasolina\\_ecuatoriana\\_y\\_su\\_incidencia\\_en\\_las\\_emisiones\\_contaminantes](https://www.researchgate.net/publication/358834216_Analisis_del_contenido_de_azufre_en_la_gasolina_ecuatoriana_y_su_incidencia_en_las_emisiones_contaminantes)

17 Quito Cómo Vamos. (2022). Informe Calidad de Vida 2022. [https://quitocomovamos.org/wp-content/uploads/2022/10/INFORME-CALIDAD-DE-VIDA-QUITO-2022\\_compressed.pdf](https://quitocomovamos.org/wp-content/uploads/2022/10/INFORME-CALIDAD-DE-VIDA-QUITO-2022_compressed.pdf)

18 Secretaría de Ambiente de Quito. Portal de datos de calidad de aire. Índice Quiteño de Calidad del Aire. <http://aireambiente.quito.gob.ec/>

19 Entrevistas realizadas a autoridades de la Secretaría de Ambiente de Quito: (1) <https://www.expreso.ec/quito/calidad-aire-tres-amenazas-asfixian-capitalinos-184617.html> y (2) <https://www.planv.com.ec/historias/plan-verde/estas-son-zonas-con-la-peor-calidad-aire-quito>

20 Quito Cómo Vamos. (2023). Informe Calidad de Vida 2023. [https://quitocomovamos.org/wp-content/uploads/2023/11/ICV-2023\\_version\\_final\\_09-nov\\_comprimido.pdf](https://quitocomovamos.org/wp-content/uploads/2023/11/ICV-2023_version_final_09-nov_comprimido.pdf)

atmosféricos y GEI. El sector del transporte en Quito es el que más aporta a las emisiones de GEI<sup>21</sup>. Según el último inventario de GEI, Quito emite 7.611.216 t CO<sub>2</sub>eq, de los cuales el 40% pertenecen al sector de transporte.

En resumen, el problema a ser abordado contempla, por un lado, las emisiones contaminantes de vehículos de combustión interna, y por el otro, la alta proporción de GEI con la que el sector de transporte contribuye a la huella de carbono de Quito (40% del total). El problema se aterriza en el polígono del CHQ, el cual evidencia niveles de contaminación de aire, y además, está catalogado en el Plan de Acción Climático de Quito 2020 como una zona libre de emisiones al 2030, objetivo corroborado por el Plan Maestro de Movilidad de Quito 2022-2042<sup>22</sup>. Finalmente, la definición del problema ahonda en el sector de transporte abordando la logística de última milla, que en las condiciones físico-espaciales del CHQ, demanda de soluciones bajas en emisiones, y a la vez soluciones a la medida de los proveedores y usuarios de este servicio.

### Descripción del piloto: Objetivos y alcance

El piloto es parte del proyecto SOLUTIONSplus; es una iniciativa respaldada por el Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea, que se centra en promover soluciones de movilidad eléctrica en diversas ciudades de todo el mundo, incluyendo Quito. El enfoque principal del proyecto es realizar pruebas piloto en diversos contextos urbanos para evaluar la viabilidad de estas soluciones y, posteriormente, trasladarlas a otras ciudades del país o de la región.

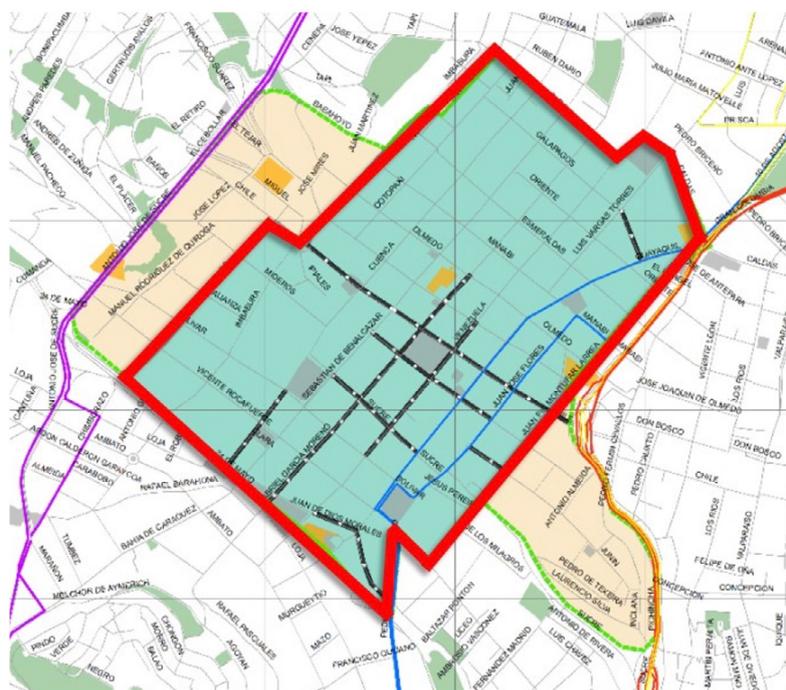
En Quito, el proyecto piloto se enmarca en el Plan de Acción Climática para Quito en 2030, donde se menciona la consolidación del "Centro Histórico Cero Emisiones". Es así que el objetivo principal de este proyecto es la prueba e introducción de vehículos eléctricos ligeros para mejorar la logística y la conectividad de la última milla en el CHQ. Éstos vehículos son del tipo bicicleta de carga que funcionan a tracción humana, pero que cuentan con la asistencia de un motor eléctrico. El área donde se llevó a cabo el piloto de electrificación de la última milla de la logística fue en el Centro Histórico de Quito, específicamente en el polígono comprendido entre las calles Carchi, 24 de Mayo, Juan Pío Montúfar y Chimborazo (ver Figura N° 7).

---

21 Secretaría de Ambiente. Quito. (2020). Plan de Acción Climática de Quito.

22 Municipio de Quito. Secretaría de Movilidad. (2023). Plan Maestro de Movilidad Sostenible del Distrito Metropolitano de Quito 2022-2042. [https://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/2023/05/PMMS-Quito\\_2022\\_2042.pdf](https://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/2023/05/PMMS-Quito_2022_2042.pdf)

Figura N°7: Área de implementación del proyecto piloto



**ÁREA DE IMPLEMENTACIÓN**

Zona delimitada por las calles

- Carchi
- 24 de Mayo
- Juan Pío Montufar
- Chimborazo

Fuente: SOLUTIONSplus.

En el largo plazo, y de llegarse a implementar a mayor escala la solución probada, se espera alcanzar una mejora en la calidad del aire de este polígono de la ciudad. Para lograr ese objetivo, de manera específica se buscó la participación de empresas proveedoras del servicio de logística y paquetería, así como la participación de comercios que utilizan el reparto de menor porte para abastecerse y proveer bienes y productos. Se puso a prueba la versatilidad de estos vehículos eléctricos versus el uso de vehículos convencionales con motor de combustión interna, o sin motor alguno, para ejercer la actividad de logística de última milla. A su vez, el piloto buscó dejar capacidades instaladas en emprendimientos locales para que sepan cómo construir y dar mantenimiento a vehículos eléctricos de este tipo, y en un futuro cercano, ofrecer a mayor escala un nuevo producto de movilidad eléctrica para el servicio de logística.

El proyecto también incluyó un estudio de percepción de usuarios del servicio de logística y peatones, con la finalidad de identificar el grado de aceptación que tendrían estos vehículos, tanto en el giro de negocio de la logística, como en la convivencia vial de residentes y población flotante del CHQ. Finalmente, el piloto exploró el potencial de usar datos cívicos para determinar las emisiones de GEI evitadas y medir la calidad del aire, así como para entender el comportamiento de los conductores de los vehículos. El Laboratorio de Ciudades del BID aportó con las actividades asociadas a estos dos objetivos específicos.

Cabe destacar que este piloto ha contado con la participación diversos actores con roles y perspectivas diferentes, que forman parte del sector privado, sector público y academia. A continuación se detallan todos los actores involucrados.

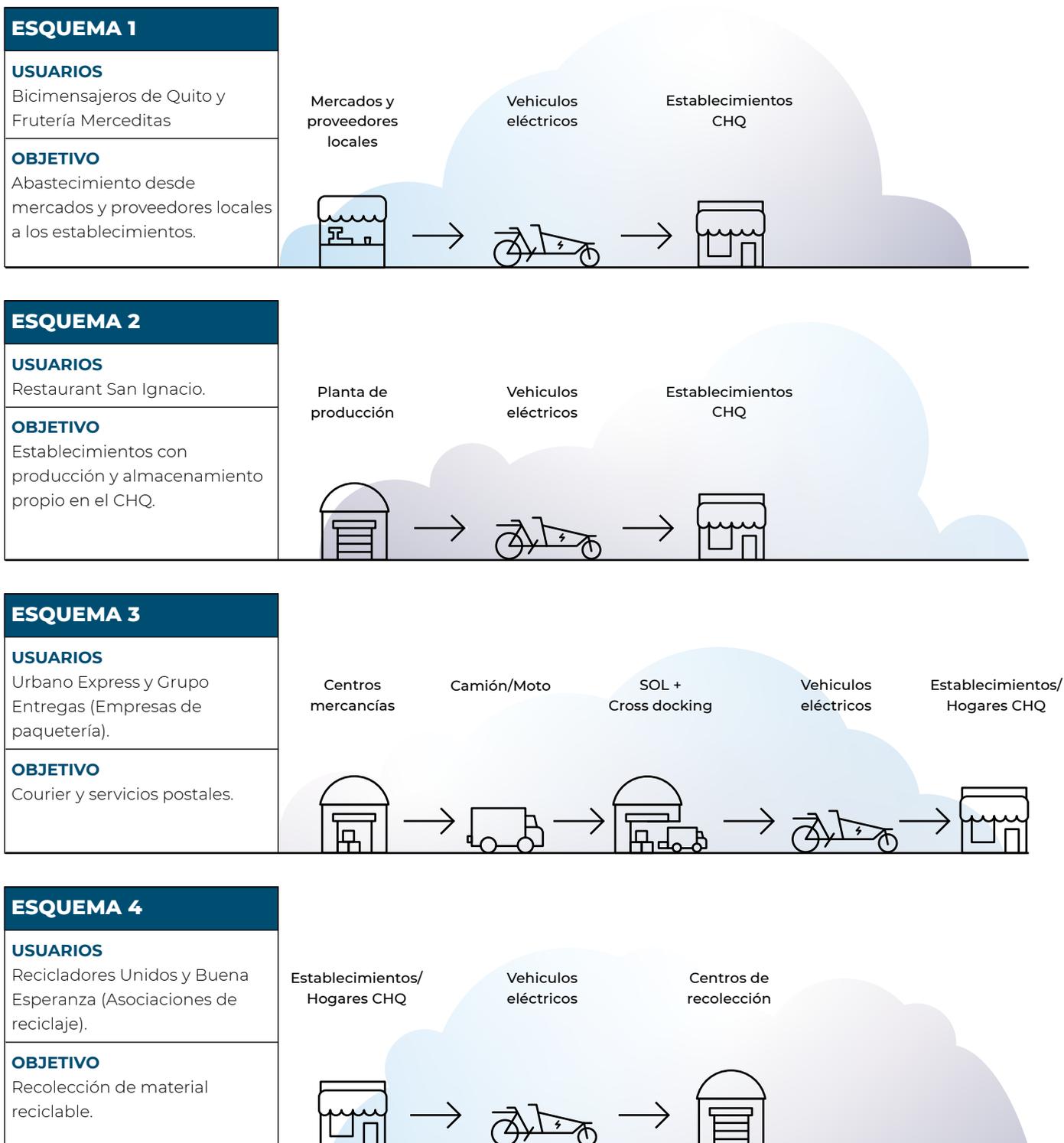
**Tabla N°3: Actores involucrados en el proyecto piloto de electromovilidad en el CHQ**

<b>ACTOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Locales Comerciales</b>	Restaurantes y cafeterías dentro de la zona.
<b>Proveedores</b>	Empresa de fabricantes de productos (bebidas, alimentos, etc.).
<b>Empresas de paquetería</b>	Empresas de paquetería liviana o courier.
<b>Sector público</b>	Municipio de Quito, Secretaría de Movilidad, Secretaría de Ambiente, Fondo Ambiental EPMMOP.
<b>Fuentes financiamiento</b>	Proyecto SOLUTIONSplus; Laboratorio de Ciudades, HUD-BID.
<b>Academia</b>	Instituto de innovación en Productividad y Logística CATENA-USFQ, Laboratorio de Análisis de vehículos y movilidad sostenible, ModeMat-EPN.

*Fuente: Proyecto "Movilidad Urbana y Electrificación Sostenible". BID.*

Para llevar adelante la primera parte del proyecto, se plantearon cuatro esquemas operativos que buscan lograr un impacto significativo en la logística y conectividad de última milla. Los esquemas operativos incluyen los actores involucrados en distintos tipos de negocios que ofrecen y demandan el servicio de la logística de última milla. Ejemplos de estos negocios son proveedores mayoristas de alimentos, cafés y restaurantes, courier y servicios postales, recolección de material reciclable, entre otros. En la Figura N° 8 se ilustran los cuatro esquemas que se pilotearon.

Figura N°8: Ilustración de los cuatro esquemas operativos del proyecto piloto



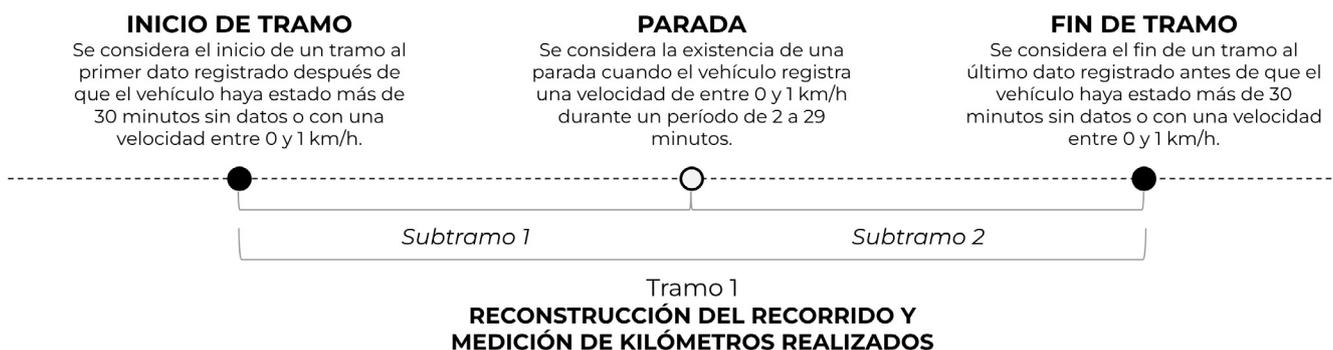
Fuente: Elaboración propia en base a información provista por SOLUTIONSplus.

Cada vehículo contó con un dispositivo que medía datos geolocalizados de calidad de aire, con lo cual se pudo analizar, además de los parámetros ambientales (PM2,5 y PM10), los kilómetros recorridos, vías más utilizadas, origen y destino de los viajes, velocidad, y GEI evitados. Este proceso de levantamiento y análisis de datos levantados por los conductores de los vehículos servirá para establecer una metodología replicable que sirva para el procesamiento de datos en proyectos similares.

Para conocer la percepción de usuarios del servicio de logística de la última milla, así como de peatones, se realizaron encuestas tanto a actores involucrados en el proyecto, como a conductores y empresas de logística que no conocían el piloto a manera de grupo de control. Dentro del grupo de control se incluyeron conductores de vehículos que trabajan de manera independiente y para empresas de logística, y también se encuestó a empresas operadoras logísticas para conocer su opinión respecto a este tipo de vehículos.

Por último, para analizar los miles de datos generados por los GPS y los sensores de los vehículos, se desarrolló una metodología que emplea herramientas de código abierto para posibilitar la reconstrucción detallada de todos los recorridos realizados. Primero se definieron algunos conceptos como recorrido, tramo, subtramo, parada y las características propias de cada uno, luego se utilizó una solución de código abierto llamada OSRM (Open Source Routing Machine)<sup>23</sup>, que posibilitó la reconstrucción de las rutas a partir de datos provenientes del proyecto OpenStreetMap<sup>24</sup>.

**Figura N°9: Metodología para la reconstrucción de los recorridos. Definición de recorrido, tramo, subtramo y paradas**



Fuente: Elaboración propia.

23 Proyecto OSRM. <https://project-osrm.org/>

24 Proyecto OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/>



Es importante destacar que al haber optado por herramientas abiertas, el código desarrollado para el análisis de los datos puede ser reutilizado por parte de otras ciudades interesadas en replicar o adaptar el proyecto a sus propias necesidades. Este enfoque promueve la colaboración y la eficiencia al permitir que otras comunidades aprovechen la experiencia y las herramientas desarrolladas, contribuyendo así al avance colectivo en la gestión de la movilidad urbana con el objetivo de monitorear la contaminación del aire.

## Descripción y resultados de las fases

El proyecto fue diseñado para ejecutarse en un esquema de tres fases; la fase 1 concluyó en diciembre de 2022 y se presentan los resultados de la misma en esta publicación. Las fases 2 y 3 están aún en desarrollo.

### Fase 1

Esta fase significó un hito clave al poner en funcionamiento 10 bicicletas eléctricas de carga, con capacidad de hasta 75 kg y una autonomía de 80 km, equipadas con dispositivos GPS y sensores de medición de la calidad del aire. Los 10 vehículos fueron probados entre noviembre y diciembre de 2022, marcando una innovación en la logística de entregas de mercancía en esta área histórica de la ciudad ya que no sólo impulsó la eficiencia en las entregas, sino que también proporcionó datos cruciales sobre el potencial de reducción de huella de carbono. La selección de vehículos abarcó diversas configuraciones para adaptarse a las necesidades logísticas específicas. Se incluyeron vehículos con carga posterior, vehículos con carga frontal y modelos de tipo Long John (ver Figura N° 10).

**Figura N°10: Vehículos incluidos en el proyecto piloto de electromovilidad en el CHQ**

**Vehículo de carga posterior**



**Vehículo de carga frontal**



**Vehículo de tipo Long John**



Fuente: SOLUTIONSplus.

Una vez que los vehículos estuvieron operativos, el Laboratorio de Ciudades del BID brindó apoyo en la elaboración del material para la comunicación y difusión del proyecto. Como se expuso en el apartado anterior, el Laboratorio de Ciudades también llevó adelante un exhaustivo análisis de los miles de datos geocalizados que fueron generados por los vehículos en la primera fase del piloto,

y realizó encuestas de percepción a clientes y usuarios del servicio de logística, peatones del CHQ y a un grupo de control (conductores, operadores logísticos y comercios del CHQ).

A partir del análisis de los datos se pudo conocer en detalle cómo funcionó la prueba piloto y cuál es el potencial de reducción de emisiones que tienen los vehículos eléctricos utilizados, lo que permitirá tomar mejores decisiones al momento de ejecutar las próximas etapas.

### Figura N°11: Vehículos en funcionamiento en el CHQ



Fuente: SOLUTIONSplus.

Durante el funcionamiento de las bicicletas eléctricas de carga (noviembre-diciembre 2022) en el CHQ se obtuvieron los siguientes resultados generales:

- Se visitaron 154 puntos para la recolección de material reciclado.
- Se realizaron 229 viajes.
- Se recolectaron 16 toneladas de carga.
- Se entregaron 956 paquetes.
- Se recorrieron 1.071 kilómetros.
- Se alcanzó un potencial de reducción de emisiones de 491,74 kg de CO<sub>2</sub>eq.

Para medir el impacto para cada esquema de trabajo se analizaron variables para comparar la situación de entrega original (sin el uso de un vehículo eléctrico ligero) con la situación durante el proyecto piloto (usando un vehículo eléctrico). En la Tabla N° 4 se resumen los resultados de un beneficiario del proyecto SOLUTIONSplus para cada esquema operativo.

Figura N°12: Reconstrucción de algunos recorridos realizados por vehículos



- Paradas
- Recorridos
- CHQ

Fuente: Elaboración propia en base a información provista por SOLUTIONSplus.

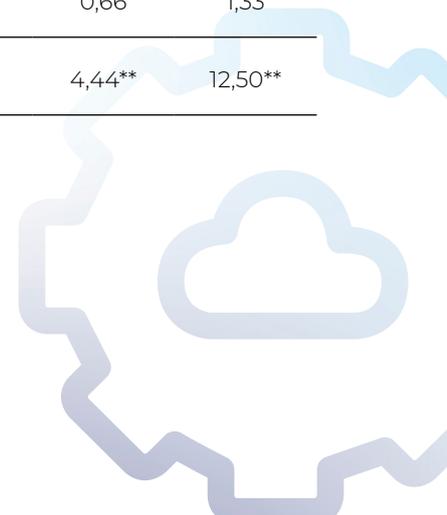
Tabla N°4: Resultados comparativos entre esquemas de trabajo

VARIABLE	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 4	
	Situación Original	Proyecto SOL+						
# de Paquetes	45	45	8	8	8	35	4	4
# de Viajes	16	8	4	2	8	35	6	3
Horas de Trabajo	7	4	1	0,5	6	6	1,5	1,67
Peso de la Carga (kg)	700	700	30	60	4	17,5	220	240
Paquetes / Viaje	3	6	2	4	1	1	0,66	1,33
Ingreso (USD)	15*	15*	N/A	N/A	5,3*	23,3*	4,44**	12,50**

\*Diario

\*\*Por hora

Fuente: Elaboración propia en base a información provista por SOLUTIONSplus.



El análisis de percepción de usuarios y proveedores del servicio de logística de última milla, y de peatones sobre los vehículos eléctricos arrojó los siguientes resultados. Se encuestó a 13 usuarios del servicio de paquetería que participaron en el proyecto SOLUTIONSplus, quienes mencionaron que en todos los casos la entrega se realizó a tiempo; 9 personas indicaron que están muy conformes y las cuatro restantes mencionaron estar conformes con el servicio. Los 13 usuarios expresaron opiniones positivas frente al potencial que tienen estos vehículos respecto a incrementar la seguridad vial, mejorar la calidad del aire, disminuir GEI y disminuir el ruido.

Respecto a la opinión de peatones en el CHQ sobre los vehículos eléctricos de la fase 1, se levantaron un total de 384 encuestas. En cuanto a la percepción de accidentabilidad, el 50% de las personas encuestadas respondió que "no" cuando se les preguntó si estos vehículos podrían causar accidentes con los peatones, mientras que un 35% dijo que sí. El 65% de peatones mencionaron que los vehículos eléctricos no se movilizan con exceso de velocidad, pero reconocen (93,2%) la necesidad de mejorar las condiciones de señalética en las vías. Las personas encuestadas creen que el uso de bicicletas de carga y otros vehículos eléctricos ligeros pueden mejorar la calidad del aire (80%), reducir GEI (79%), reducir el ruido (80%), disminuir el tráfico (65%), mejorar la salud (78%) e incrementar la seguridad de usuarios vulnerables (66%).

Como grupo de control se encuestó a 101 locales comerciales del CHQ, 106 conductores que realizan entregas en el CHQ y a 6 operadores logísticos. El 64% de los locales comerciales sí estarían interesados en utilizar vehículos eléctricos, pero consideran a la seguridad (22%) y el costo de compra de un vehículo eléctrico (21%) como las principales barreras para que se haga una realidad en el CHQ. El 54% de los locales comerciales prefiere la furgoneta eléctrica de reparto (54%) y cuadríciclos (23%). A pesar de que las personas encuestadas de los locales comerciales están totalmente de acuerdo (más del 81% de las respuestas) con que los vehículos eléctricos reducen los GEI, gases contaminantes y el ruido, menos del 40% de las respuestas considera que los vehículos eléctricos reducirán el número de viajes.

Los conductores encuestados (de motocicleta en su mayoría: 44%) indicaron que las barreras para implementar vehículos eléctricos son la seguridad (25%) y el costo para adquirir (21%) y rentar (12%) un vehículo eléctrico. Adicionalmente los conductores tienen la percepción de que la topografía de Quito afecta al rendimiento de la batería del vehículo, por lo que preferirían probarlo bajo la modalidad de renta antes que comprarlo. El tipo de vehículo eléctrico preferido por los conductores encuestados fue el cuadríciclo (34%), la furgoneta (30%) y la bicicleta tipo Long John (18%).

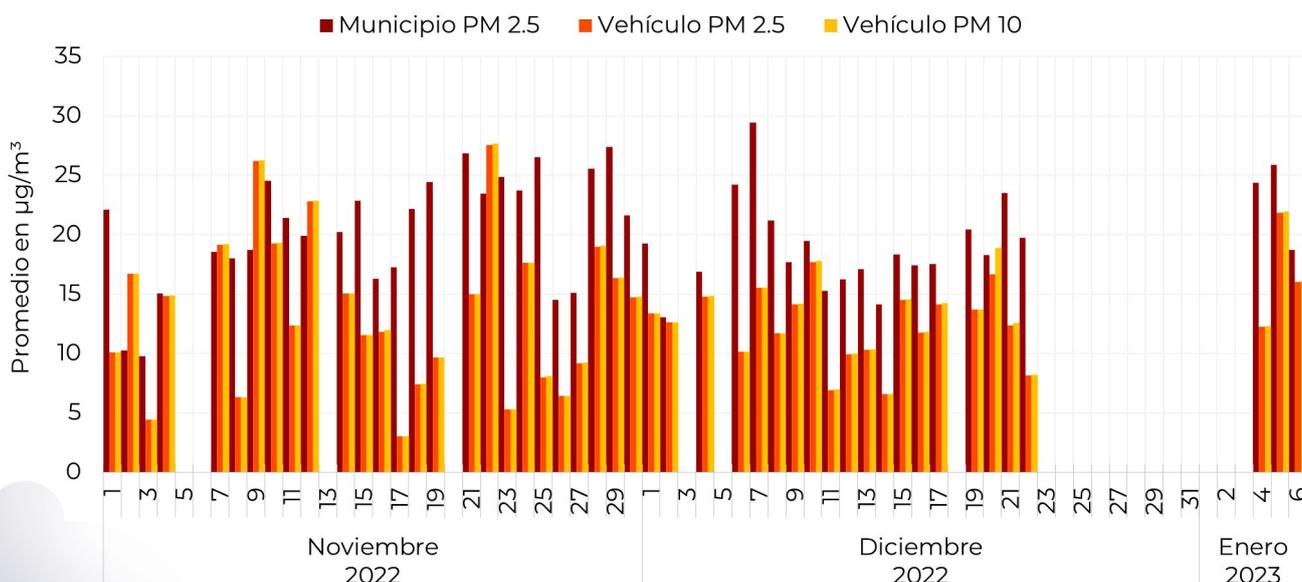
Las empresas operadoras de logística encuestadas indicaron que la principal barrera para implementación de vehículos eléctricos es la falta de oferta de los

La mayor parte de los encuestados cree que las bicicletas de carga y los vehículos eléctricos ligeros pueden mejorar la calidad del aire, reducir GEI, el ruido y el tráfico, mejorar la salud y aumentar la seguridad vial.

mismos en el mercado (18%), resaltando también la falta de voluntad política (12%), la seguridad (12%), los problemas mecánicos (12%), la normativa (12%), el costo de compra del vehículo (12%) y el costo de contratación del servicio (12%). El vehículo eléctrico preferido por los operadores logísticos fue la furgoneta eléctrica de reparto (83%), sin embargo, indican que el tiempo de carga duraría demasiado y que la topografía de Quito afectaría al rendimiento de la batería. Todos los operadores logísticos encuestados están totalmente de acuerdo que el uso de estos vehículos reducirían emisiones de GEI, gases contaminantes y ruido.

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones de calidad del aire a través de los sensores colocados en los vehículos eléctricos que circularon durante el período de la fase 1 del proyecto (noviembre y diciembre de 2022). Los parámetros que se midieron fueron el material particulado 10 (PM10) y material particulado 2.5 (PM2.5), los mismos que fueron comparados con las mediciones de la estación de monitoreo de calidad del aire del Municipio de Quito, ubicada en el Centro Histórico de la ciudad. En la Figura N°13 se pueden ver los resultados de las mediciones, comparando los resultados de los sensores móviles y del sensor de la estación del Municipio de Quito. A pesar de que las mediciones arrojan valores distintos para cada día de medición, la tendencia de los datos da cuenta de que los sensores móviles son aptos para hacer monitoreos complementarios a las estaciones fijas del Municipio. Para ello se sugiere realizar una calibración tomando como referencia la estación de monitoreo del Municipio, la cual constantemente es revisada y calibrada según los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica.

**Figura N° 13: Evolución diaria del PM2.5 y PM10 registrados en el CHQ por la estación fija del Municipio y por los vehículos eléctricos durante la Fase 1**



Fuente: Elaboración propia en base a información provista por la Municipalidad de Quito y por SOLUTIONSplus.

## Fases 2 y 3

La segunda fase del proyecto inició a mediados de 2023 e incluirá la incorporación de 10 cuadriciclos eléctricos con capacidad de carga hasta 400 kg y una autonomía de 60 km. La tercera fase del proyecto se llevará adelante en 2024 e incluirá la incorporación de minivans eléctricas con capacidad de carga hasta 600 kg. Para estas dos fases se repetirá la estrategia de buscar proveedores locales de vehículos, y la conformación de esquemas de servicio de logística de última milla que sean del interés y beneficio de proveedores y usuarios.

**Figura N°14: Vehículos a incluir en la segunda y tercera fase del proyecto**



Fuente: SOLUTIONSplus.

## Escalabilidad y replicabilidad del piloto en otras ciudades de la región

Los resultados presentados sobre los cuatro esquemas operativos sugieren que el uso de los vehículos eléctricos ligeros optimiza el trabajo de logística de última milla. Así mismo, la percepción de los actores entrevistados es positiva respecto a los beneficios de utilizar vehículos eléctricos para reducir emisiones de GEI, gases contaminantes y ruido. Este proyecto piloto puede ser fácilmente replicado en otros polígonos de la ciudad y en otras ciudades que tienen como estrategia establecer distritos con cero emisiones. Así mismo, el hecho de haber utilizado herramientas de acceso libre, y haber aplicado análisis de código abierto facilita la réplica del piloto. Este tipo de pilotos representa una gran oportunidad para evaluar (a un costo adicional relativamente bajo) el impacto de nuevas tecnologías de transporte en la calidad del aire estableciendo áreas de control de condiciones similares a aquellas donde se ejecuta el piloto. Además de dar rigurosidad a los resultados del estudio, este tipo de acciones permiten realizar cálculos del costo beneficio de estas soluciones, lo cual puede ser muy útil para otras ciudades.

En cuanto a la escalabilidad, uno de los retos más grandes que tiene la transición hacia la electrificación de la última milla de la logística, es el costo de adquisición de los vehículos eléctricos. Este aspecto también fue identificado por actores encuestados. En este sentido, es importante identificar bien qué perfil de empresas o repartidores independientes serían los potenciales usuarios

de vehículos eléctricos, para diseñar esquemas de financiamiento para la compra, o esquemas de renta, que se ajusten a sus capacidades de pago, dinámica de trabajo, tipo de productos que transportan y zona de la ciudad donde trabajan. Las encuestas de los grupos de control arrojan información interesante sobre qué se debe tener en cuenta al momento de informar, comunicar y proponer un programa de electrificación de la logística; su triangulación con los datos levantados durante la fase de prueba es esencial para cambiar ciertas percepciones negativas hacia la electromovilidad. Por ejemplo, los locales comerciales que no participaron del proyecto creen que los vehículos eléctricos ligeros no son más eficientes (en número de viajes de logística) comparado con vehículos normales, cuando en realidad el proyecto piloto demostró lo contrario (ver Tabla N° 4 de resultados de cada esquema operativo).

El presente piloto es un gran ejemplo del potencial que tiene el involucramiento de actores para la generación de datos mientras realizan sus labores habituales. El análisis y comunicación de estos datos puede ayudar a que distintos actores del sector de la logística cambien su percepción e incluso comportamiento en el ejercicio diario de sus actividades, planificando mejor sus viajes, seleccionando vías alternativas, y mejorando la convivencia con los otros usuarios del espacio público.



## CAPÍTULO 3

# Piloto en Bogotá, Colombia Proyecto "Transporte Limpio"



## Problemática detectada

La ciudad de Bogotá cuenta con más de 7,8 millones de habitantes (DANE, Proyecciones 2021)<sup>25</sup> y 2.5 millones de vehículos circulando a diario (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019)<sup>26</sup>. Según la Encuesta de Movilidad del año 2019<sup>27</sup>, cada día se realizan más de 500.000 viajes desde los municipios aledaños de la región a la ciudad, lo que aumenta la presión de los sistemas urbanos de la ciudad y suma volúmen de tráfico en los principales corredores interurbanos e intermunicipales.

Como toda ciudad capital, Bogotá tiene grandes responsabilidades en el abastecimiento y el transporte asociado a éste, que generan importantes impactos en el medio ambiente. En los últimos años, ha aumentado la preocupación pública y gubernamental por el medio ambiente, lo que ha llevado a que las empresas enfrenten una creciente presión para minimizar el costo ambiental de sus operaciones logísticas. En términos generales, la distribución de bienes afecta la calidad del aire local, produce ruido y vibraciones, y tiene un impacto significativo en el cambio climático y calentamiento global (Barbero, Fiadone & Millán, 2020)<sup>28</sup>.

En el ámbito de la logística y el abastecimiento, el sector transportador de carga en Bogotá representa tan sólo un 1,05% del total del parque automotor (RUNT, 2020)<sup>29</sup>. Sin embargo, según el último inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá (2022)<sup>30</sup>, este aporta el 42% del PM10 y el 40% del PM2.5. Además, según un estudio realizado en 2021 por la Universidad de Los Andes y la Universidad de Cardiff<sup>31</sup>, este sector aporta el 4,47% de la producción de monóxido de carbono (CO) y el 42% de las emisiones de dióxido de carbono (CO2).

Conducir de forma eficiente disminuye el consumo de combustible, las emisiones al ambiente y aumenta la seguridad en la conducción. A pesar de que los vehículos han presentado una gran cantidad de avances tecnológicos en los últimos años, los métodos de conducción han experimentado pocos cambios (Correa Espinal, Cogollo Flórez & Salazar López, 2010)<sup>32</sup>. En este contexto, uno de los mayores desafíos que afronta la ciudad en términos de calidad del aire es la

25 Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018). Censo Nacional de Población y de Vivienda. Proyecciones de población 2021. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

26 Secretaría Distrital de Movilidad. Bogotá. (2019). Encuesta de Movilidad de Bogotá.

27 Ibid.

28 Barbero, J. A., Fiadone, R., & Millán Placci, M. F. (2020). El transporte automotor de cargas en América Latina. Nota técnica del BID, 1877. <https://publications.iadb.org/es/el-transporte-automotor-de-cargas-en-america-latina>

29 Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT, 2020). Flota oficial.

30 Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá. Inventario de gases de efecto invernadero de Bogotá - INGEI. <https://www.ambientebogota.gov.co/inventario-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei>

31 Universidad de los Andes. (2021). Discusiones sobre Ambiente para el Desarrollo No.5. Análisis de desigualdades múltiples y políticas de reducción de la contaminación. <https://economia.uniandes.edu.co/sites/default/files/publicaciones/disc-ambiente/Discusiones-sobre-Ambiente-para-el-Desarrollo-No.5.pdf>

32 Correa Espinal, A. A., Cogollo Flórez, J. M., & Salazar López, J. C. (2010). Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. Producción + Limpia, 5(1), 95-112. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3991580>

reducción de emisiones provenientes del transporte de carga, originadas por factores técnicos y humanos. Para esto, es necesario mejorar las herramientas de medición y monitoreo, así como transformar los comportamientos individuales y colectivos en este sector.

## Descripción del piloto: Objetivos y alcance

En el año 2021 se estableció la alianza “Bogotá, Territorio Inteligente”, un grupo conformado por gremios privados, universidades y emprendedores urbanos que impulsó el proyecto piloto llamado “Transporte Limpio” como medio para disminuir la producción de emisiones en Bogotá y su región circundante. Este proyecto se propuso generar información que permita medir las emisiones generadas por el transporte de carga, y al mismo tiempo promover prácticas de conducción más sostenibles. Además, el proyecto “Transporte Limpio” nace en el contexto del Plan Aire 2023 (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá)<sup>33</sup>, una hoja de ruta que le permite a la ciudad gestionar y reducir el nivel de concentración atmosférica a través de decisiones y acciones estructurales.

El objetivo del proyecto piloto fue desarrollar una metodología para el sector transportador de carga que permita medir y monitorear en tiempo real las emisiones contaminantes y el desempeño logístico de empresas del sector que operan en Bogotá. A lo largo del proyecto se puso foco en el diseño de aplicaciones digitales que impulsen la reducción de estas emisiones y la optimización logística mediante un proceso conocido como gamificación o ludificación. Esta metodología promueve el uso de técnicas, elementos y dinámicas propias de los juegos y el ocio. Se aplican en actividades no necesariamente recreativas con el fin de potenciar la motivación y reforzar una conducta para solucionar un problema y lograr un objetivo. Por lo tanto, la hipótesis de la cual se parte es que el uso de aplicaciones digitales que emplean sistemas de juego permiten optimizar la logística y reducir las emisiones de GEI.

Un informe publicado por el Proyecto Giro Zero en 2022<sup>34</sup>, indicó que, en estudios realizados sobre los beneficios de la conducción eficiente, el resultado que se ha podido observar es que cuando los conductores de transporte de carga participan en este tipo de capacitaciones, logran ahorrar entre un 5% y un 35% en el consumo de combustible. Esto se traduce en un beneficio ambiental ya que es proporcional a la cantidad de emisiones reducidas.

El piloto se desarrolló en dos fases. La primera, financiada con recursos de P4G<sup>35</sup>, estuvo orientada a la construcción de la metodología de medición, cálculo y visualización de la información, bajo la premisa de que las mediciones in situ son una herramienta muy útil para el ajuste y precisión

33 Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá. (2023). Plan Aire 2023. <https://www.ambientebogota.gov.co/plan-aire-2030>

34 Rey, A. F., et al. (2022). Necesidades de capacitación - Proyecto Giro Zero. Promoviendo al Transporte Automotor de Carga hacia las cero emisiones. <https://girozero.uniandes.edu.co/system/files/2022-11/docs/5.2%20Training%20needs%20assessment%20%28TNA%29%20for%20the%20Colombian%20RFT%20Report.pdf>

35 P4G ofrece subvenciones, apoyo a los sistemas de capacitación a través de plataformas nacionales y asistencia técnica a asociaciones con empresas que trabajan en soluciones de mitigación y adaptación al cambio climático en los ámbitos de la alimentación, el agua y la energía. Dentro de estas áreas se centran en soluciones climáticas financieramente sostenibles.

de cálculos de emisiones. En la segunda fase, financiada por el Laboratorio de Ciudades del BID, se incorporó un sistema de ludificación con una aplicación capaz de parametrizar el desempeño de los usuarios y de vincularlos por medio del juego, para así promover la mejora en hábitos de conducción en el sector de transporte de carga y la disminución de emisiones.

El alcance de la segunda fase del proyecto contempla el diseño de una estrategia de ludificación y de un modelo integral de datos, la identificación y priorización de variables, la definición del modelo matemático, el diseño de la arquitectura del sistema, la definición de los mockups, y la evaluación de la usabilidad de la aplicación. Este último aspecto resulta fundamental para garantizar que la experiencia del usuario sea efectiva, eficiente y satisfactoria.

Cabe destacar que, “Transporte Limpio” se concibió como un ejercicio de varios aliados con una experiencia mixta de organizaciones asociadas directa o indirectamente a la gestión logística de la movilidad. En la Tabla N° 5 se detallan todos los actores involucrados.

**Tabla N°5: Actores involucrados en el proyecto piloto “Transporte Limpio”**

ACTOR	DESCRIPCIÓN
Usuarios	Conductores, operadores logísticos de flota y gerentes de sostenibilidad de las empresas.
Sector público	Secretaría Distrital de Ambiente; Secretaría Distrital de Movilidad.
Sector privado	ANDI (Asociación Nacional de Industriales de Colombia); Monitor+ SAS; Clarke Modet.
Fuentes financiamiento	Fase 1: P4G (Partnering for Green Growth). Fase 2: Laboratorio de Ciudades, HUD-BID.
Academia	Universidad del Rosario; Universidad EAN.

Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. BID

## Descripción y resultados de las fases

### Fase 1

La primera etapa de este proyecto, que contó con el apoyo de la organización de cooperación internacional P4G, se enfocó en validar una prueba de concepto para la recolección en tiempo real de información sobre la producción de emisiones. Esto se logró mediante tres líneas de acción:

#### 1. Buscar soluciones tecnológicas para establecer una metodología de captura de información in situ en vehículos de carga.

Para la captura de información se calibraron 27 camiones. Primero, se instalaron dispositivos de captura y transmisión de datos que, además de capturar los datos del Sistema de Diagnóstico



a Bordo (OBD, por su sigla en inglés), los transmite para ser visualizados en tiempo real a través de una plataforma, y al mismo tiempo los almacena para su utilización en análisis posteriores (Ortenzi & Costagliola, 2010)<sup>36</sup>. Luego se realizó una prueba de carga, en la cual, a través del uso del dinamómetro estático<sup>37</sup>, se sometió a una muestra representativa de los vehículos a distintos grados de esfuerzo para generar las curvas de desempeño (Torque y Potencia del motor) en diferentes condiciones. Por último, para cada punto de carga y velocidad definido en el procedimiento del dinamómetro se tomó una lectura estabilizada de las emisiones de los gases correspondientes. Este dato se registró y, posteriormente, se analizó la relación que existe entre cada una de las emisiones y los parámetros operativos del motor durante la prueba en el dinamómetro. Estas relaciones permitieron obtener curvas de emisión para varias condiciones operativas indicativas.

**Figura N°15: Dispositivo IoT instalado en vehículos de carga**



Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. Probogotá Región.

## 2. Diseñar un modelo matemático para procesar la información recolectada.

La modelación matemática asociada con el proyecto se puede dividir en dos grandes grupos. El primero de ellos se encuentra relacionado con el tratamiento de los datos obtenidos durante el proceso de calibración, y el segundo, aquel derivado de este primer análisis y utilizado para la estimación de emisiones. Por lo tanto, una vez que se obtienen los datos capturados por el equipo de medida de gases, el dinamómetro y aquellos obtenidos del OBD del vehículo, se procede con el análisis de éstos y la aplicación de modelos matemáticos que permitan definir, a partir de datos específicos, una función que estime las emisiones del mismo vehículo en cualquier condición de operación.

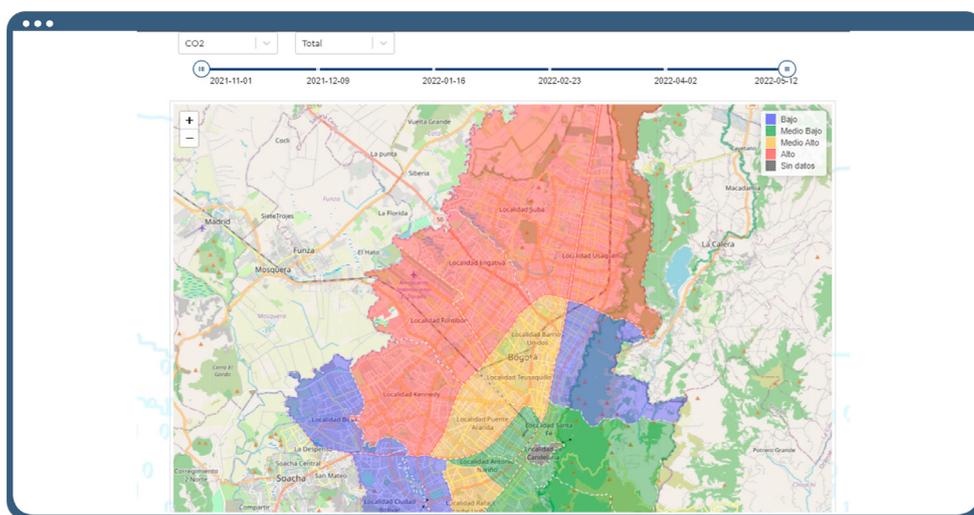
36 Ortenzi, F., & Costagliola, M. A. (2010). A new method to calculate instantaneous vehicle emissions using OBD data. En SAE Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1289>

37 Los dinamómetros estáticos son un instrumento técnico común en CDA (Centros de Diagnóstico Automotor), consistentes en series de dos o más rodillos fijos en el suelo que cuentan con infraestructura tecnológica complementaria para medir distintos tipos de variable de desempeño motor al vehículo, mientras el automóvil se encuentra inmovilizado.

**3. Visibilizar la información recolectada en dispositivos accesibles al público.**

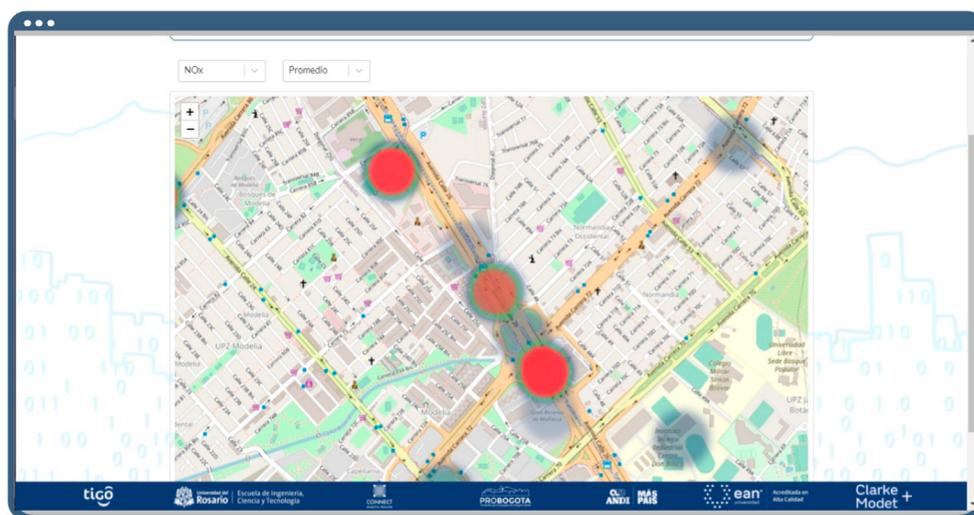
A partir de la metodología de acceso a datos del vehículo y el modelo matemático para el procesamiento de la información, se diseñó un sitio web interactivo de acceso al público general que permitió interactuar con los datos parciales procesados en la fase 1. En el sitio web se habilitaron diferentes visualizaciones de datos (gráficos y mapas) para la ciudadanía y se creó un portal con acceso restringido para que las empresas que participaron del piloto pudieran conocer el desempeño detallado de sus vehículos.

**Figura N°16: Mapa de emisiones acumuladas**



Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. Probogotá Región.

**Figura N°17: Mapa de emisiones de un trayecto medio**



Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. Probogotá Región.

## Fase 2

La segunda etapa del proyecto, que contó con el apoyo del Laboratorio de Ciudades del BID, se focalizó en el diseño de una metodología que, a partir del uso de tecnología y datos, promueva la reducción de emisiones de combustión y mejore los hábitos de conducción en el sector de transporte de carga.

Al inicio de esta etapa se realizó un workshop que permitió definir con precisión el alcance y los objetivos de la segunda fase. En el taller, que contó con la participación de integrantes del Laboratorio de Ciudades del BID, de Probogotá y de la Alcaldía de Bogotá, se expusieron los resultados de la Fase 1 y a partir de ellos se llegó a la conclusión de que el comportamiento inadecuado de los conductores es una de las principales causas de las emisiones generadas por fuentes móviles, en particular, en el transporte de carga.

Con el objetivo de concientizar a los conductores, se trabajó en el diseño de una estrategia de gamificación o ludificación que promueva una mejora en los hábitos de manejo y en las decisiones de quienes planifican las rutas de despacho. A su vez, dado que se identificaron algunas oportunidades de mejora sobre los resultados de la Fase 1, esta segunda etapa del proyecto también se enfocó en el refinamiento de los componentes funcionales de toda la plataforma y del modelo matemático.

Para llevar adelante todos los objetivos planteados, la segunda fase del proyecto se dividió en tres líneas de acción:

### 1. Revisión, rediseño y documentación del procesamiento de datos.

Para poder llevar a cabo un proceso que permita estimar el nivel de emisiones proveniente de la conducción de los camiones, es necesario contar con una fuente de datos de calidad que permita, no solo crear un modelo preciso, sino tener datos adecuados sobre las rutas. Por este motivo, en la Fase 2 se ha trabajado en la revisión, rediseño y documentación de todos los procesos conducentes a preprocesar los datos, garantizar su integridad y calidad para que los resultados de cada fase tengan la mayor precisión posible.

Particularmente, se identificaron problemas en los datos generados durante la calibración debido a la infraestructura tecnológica utilizada en algunos vehículos, lo que resultó en desalineación, vacíos y datos fuera de escala. No obstante, para abordar estos temas se procedió a unificar frecuencias de lecturas, filtrar ruido y probar algoritmos de imputación de datos, logrando así generar valores adecuados para completar el conjunto de datos destinado al cálculo del modelo.

Cuando los conductores de transporte de carga mejoran sus hábitos de conducción, pueden ahorrar entre un 5% y un 35% en el consumo de combustible. Esto se traduce en un beneficio ambiental ya que es proporcional a la cantidad de emisiones reducidas.

## 2. Ajuste del modelo matemático para la medición de emisiones vehiculares.

El modelo matemático recibe los datos de emisiones y operación del vehículo y modela el comportamiento de los gases en diferentes condiciones del motor. Pero además de la información de operación del motor, los vehículos reportan su ubicación de manera permanente. Estos datos incluyen latitud, longitud, altitud, velocidad y un estimado de la trayectoria actual. A partir de la información de seguimiento geográfico, se han podido encontrar algunos patrones que no habían sido explorados en la Fase 1. Por ejemplo, se lograron observar zonas de velocidad baja o nula que identifican puntos de carga y descarga, o segmentos de vía con altos niveles de tráfico.

También se trabajó en el cálculo de la pendiente de la ruta, que tiene un impacto directo en el nivel de esfuerzo del motor: alto esfuerzo en caso de que vaya escalando, o bajo esfuerzo si el vehículo está bajando de una pendiente. Por lo tanto, la información georreferenciada es crítica para obtener una visión completa de las emisiones de los vehículos en varias condiciones de conducción.

## 3. Diseño de la plataforma de gamificación para incentivar la reducción de emisiones.

Una parte fundamental de la segunda fase del proyecto fue la introducción de la ludificación como herramienta para promover cambios de comportamiento en los factores operacionales clave que producen hoy la principal cantidad de emisiones de las flotas vehiculares. Por una parte, la información recolectada por medio de la metodología desarrollada permite identificar puntos críticos en la producción de emisiones de los vehículos. Por otra parte, la plataforma de ludificación ofrece los medios para incentivar, por medio de sistemas de juego, dinámicas que permitan abordar los problemas identificados.

El objetivo principal con el que se diseñó el juego es reducir al máximo las emisiones de GEI. Para esto, los conductores deben competir por quién puede transportar la mayor carga generando la menor cantidad de emisiones de gases contaminantes. Esto debería promover un uso más eficiente de los vehículos y reducir significativamente el impacto ambiental.

En el juego se incluyen retos comunales y desafíos específicos para los conductores, fomentando una participación activa y una competencia saludable. Los desafíos específicos cambian regularmente y pueden estar relacionados con aspectos de la conducción, como por ejemplo la reducción de velocidad en horas, áreas o tiempos, o la reducción de emisiones. El juego también evalúa el desempeño de los conductores y vehículos, añadiendo un componente de competencia y recompensas que se otorgan a medida que los conductores y equipos alcancen ciertos hitos y logros. Estos pueden incluir medallas virtuales, certificados de logro, o puntos que la empresa puede convertir en canjeables. Reconocer y recompensar los esfuerzos de los participantes es clave para mantener su motivación.

A su vez, las interacciones del juego se basan en rankings personales, de equipos y comunales, similar a cómo funcionan las competencias deportivas (ver Tabla N° 6). Esto agrega emoción y un sentido de logro a la misión de reducir las emisiones.

**Tabla N°6: Interacciones de los conductores**

RANKINGS PERSONALES	RANKINGS DE EQUIPOS	RANKINGS COMUNALES
<p>Cada conductor puede acceder a su propio perfil en la plataforma y ver métricas de su rendimiento personal a lo largo del tiempo. Los conductores pueden establecer objetivos personales y realizar un seguimiento de su progreso. A medida que mejoren su desempeño, subirán en sus clasificaciones personales.</p>	<p>Los conductores se agrupan en equipos o grupos, lo que fomenta la colaboración. Los equipos pueden competir por el mejor rendimiento colectivo en términos de proporción de carga versus kilómetros y tiempo. Se anima a los equipos a trabajar juntos para mejorar su posición en el ranking de equipos.</p>	<p>Se pueden establecer desafíos comunales más amplios. Esto involucra a toda la comunidad de conductores en un área o región específica. Los resultados se reflejan en clasificaciones comunales para fomentar un sentido de comunidad y responsabilidad compartida.</p>

Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. BID

Los supervisores y administradores de flotas de transporte también pueden unirse a estos retos de manera similar a los conductores y trabajar para cumplir los objetivos establecidos (ver Tabla N° 7). La plataforma puede rastrear y registrar el progreso de ellos en la realización de estos retos y proporcionar reconocimientos y recompensas correspondientes, lo que contribuiría a mantener su motivación y compromiso.

**Tabla N°7: Retos que pueden afrontar los supervisores y administradores**

RETO DE OPTIMIZACIÓN DE FLOTA	RETO DE GESTIÓN DE CONDUCTORES	RETO DE PLANIFICACIÓN DE RUTAS
<p>Los supervisores y administradores pueden establecer un reto para optimizar la asignación de tareas y rutas de la flota. El objetivo sería mejorar la eficiencia general, reducir los tiempos de viaje y minimizar las emisiones de gases contaminantes. Los administradores pueden recibir recompensas o reconocimientos por cumplir con estos desafíos.</p>	<p>Los supervisores y administradores pueden enfrentar retos relacionados con la gestión de conductores, como mejorar los KPI de la flota, reducir incidentes de conducción peligrosa o minimizar los tiempos de inactividad de los vehículos. El cumplimiento de estos retos podría traducirse en beneficios para la empresa, como menores costos operativos.</p>	<p>Los supervisores y administradores pueden competir por diseñar las rutas más eficientes y sostenibles para los conductores. Esto implica considerar factores como la carga de trabajo, la disponibilidad de vehículos y las condiciones del tráfico. Los administradores pueden recibir reconocimientos por lograr rutas más eficientes y amigables con el medio ambiente.</p>

Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. BID

La evaluación del cumplimiento de estos retos se basa en la determinación de una serie de indicadores de desempeño que permita la cuantificación de aspectos puntuales de las rutas. Por ejemplo, cuando se aplicaron a una ruta específica de la fase 1, se pudieron calcular 59 puntos de frenado súbito, donde la velocidad bajó más de 40 km/h en menos de 5 segundos; igualmente, se pudieron determinar porcentajes de tiempo en congestión o áreas de baja velocidad, donde el camión estuvo casi el 10% del tiempo transitando a velocidades de hasta 5 km/h. Además, cuando los puntos se georreferencian, se pueden identificar zonas críticas en donde las emisiones son mayores que el promedio; por ejemplo, la entrada a Bogotá desde el municipio de Cota presenta una alta concentración de CO<sub>2</sub> e hidrocarburos, asociados con una condición de baja movilidad.

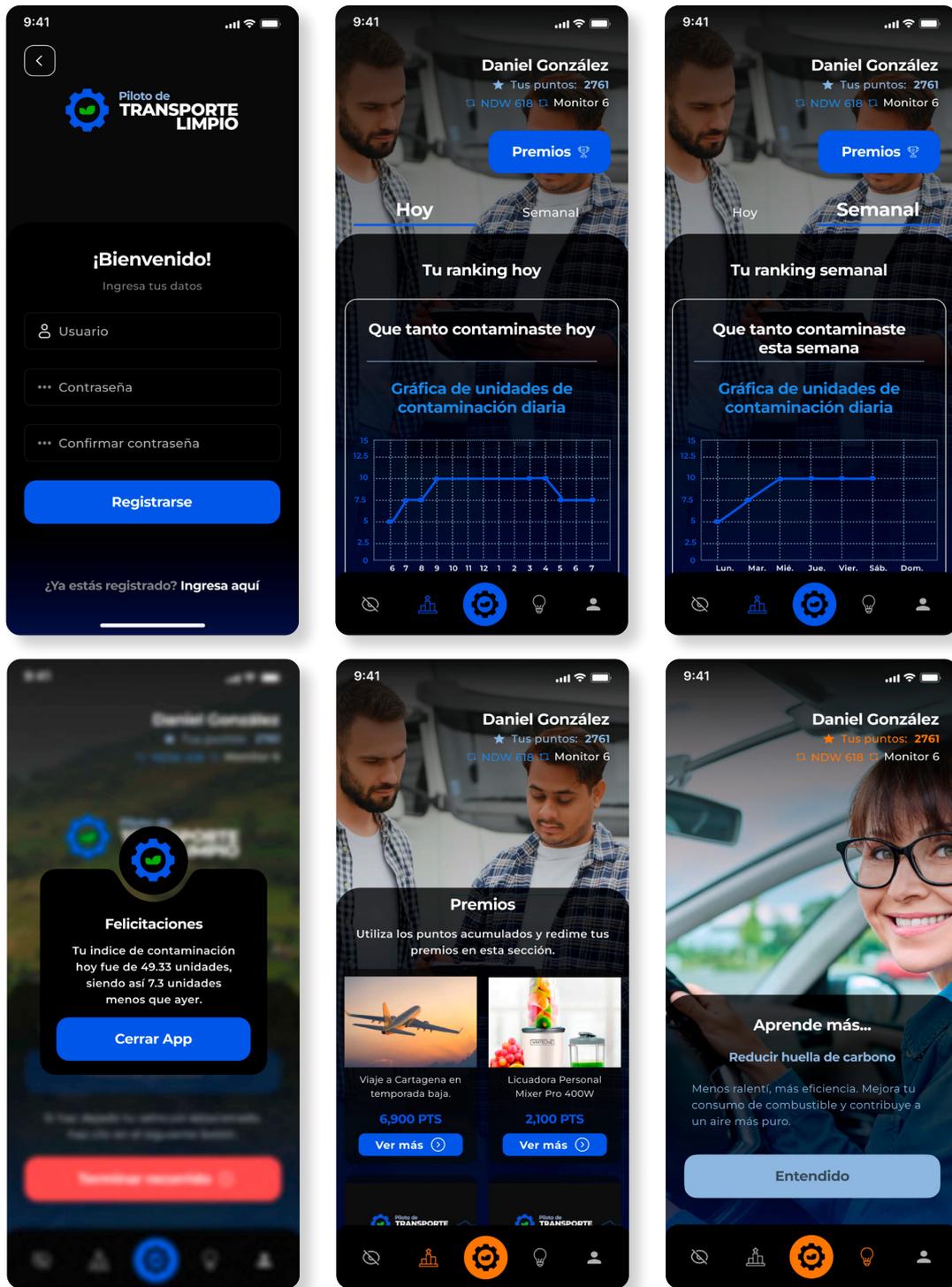
## USO DE LA APLICACIÓN

En cuanto al uso de la aplicación, puede dividirse en siete pasos:

- 1. Instalación de la aplicación:** Los conductores de camiones de carga instalan la aplicación en sus dispositivos móviles.
- 2. Rastreo de comportamiento y telemetría:** La aplicación utiliza sensores y la telemetría del vehículo para rastrear el comportamiento del conductor durante sus viajes. Se evalúan diversos aspectos, como la velocidad, las frenadas bruscas, la aceleración, y otros indicadores clave de eficiencia y seguridad en la conducción.
- 3. Evaluación y puntuación:** Basándose en los datos recopilados, la aplicación evalúa el desempeño del conductor en términos de eficiencia de combustible y prácticas amigables con el medio ambiente. Cada conductor recibe una puntuación diaria y semanal que refleja su rendimiento general.
- 4. Rankings comparativos:** La aplicación genera rankings diarios y semanales que comparan a los conductores de un mismo equipo.
- 5. Recompensas por buenas prácticas:** Los conductores que demuestren buenas prácticas y eficiencia en la conducción son recompensados. Las recompensas pueden incluir bonificaciones, reconocimientos o privilegios especiales dentro del equipo.
- 6. Mensajes educativos y tips:** La aplicación proporciona mensajes educativos y tips personalizados para cada conductor, basados en sus áreas de mejora. Estos consejos están diseñados para ayudar a los conductores a aprender y aplicar prácticas más sostenibles y eficientes.<
- 7. Conciencia ambiental:** La aplicación no solo se centra en la eficiencia de conducción, sino que también promueve la conciencia ambiental. Proporciona información sobre la huella ambiental de la conducción de camiones y destaca la importancia de reducir la contaminación.

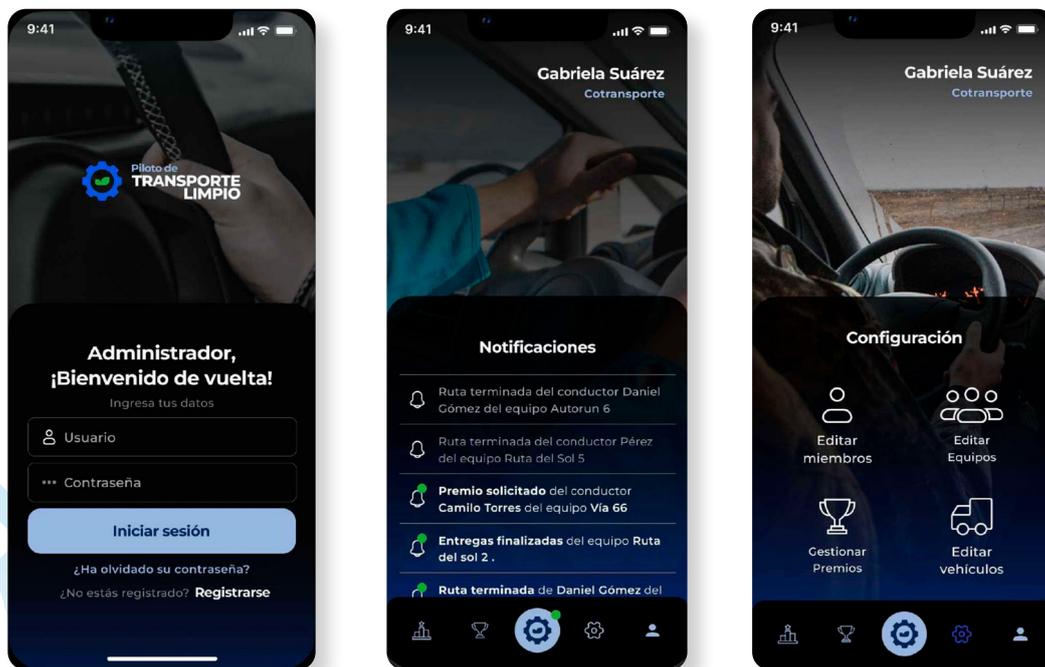


Figura N°18: Diseño de las pantallas de la aplicación - Usuario Conductor



Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. BID

Figura N°19: Diseño de las pantallas de la aplicación - Usuario Supervisor o Administrador



Fuente: Proyecto “Transporte Limpio”. BID

En cuanto a la evaluación de la usabilidad de la aplicación, el principal objetivo era asegurar que la aplicación “Transporte Limpio” motive a los conductores de carga a utilizarla de forma regular. Se utilizaron métodos cualitativos y cuantitativos. En cuanto a los métodos cualitativos, se realizó una observación directa sobre algunos conductores en el momento que estaban interactuando con la aplicación con el fin de identificar patrones de uso, dificultades y estrategias de navegación. A su vez, se llevaron adelante diálogos con los conductores inmediatamente después de completar cada tarea para recoger impresiones detalladas y comentarios sobre la experiencia de uso. En lo que respecta a los métodos cuantitativos se realizaron encuestas de satisfacción a partir del System Usability Scale (SUS)<sup>38</sup>, que permite obtener una medida estandarizada de la satisfacción del usuario. En el final de la encuesta se utilizó como herramienta el Net Promoter Score (NPS)<sup>39</sup> con escala de 1 a 10 para saber si los conductores estarían dispuestos a continuar utilizando la aplicación y a recomendarla a sus compañeros.

La evaluación se realizó sobre cinco conductores de carga, todos con perfiles totalmente diferentes, que reflejan variedad de experiencias, habilidades y expectativas. En cuanto a los resultados obtenidos, el 80% de los usuarios entendió el funcionamiento de la app en los primeros usos, mientras que el 20% necesitó volver hacia atrás en su navegación para leer los avisos de información. A su vez, el SUS registró un score promedio de 74 puntos, y el NPS logró 10 en todos los casos.

38 El System Usability Scale (SUS) está diseñado para evaluar la usabilidad de un sistema ya que proporciona una métrica objetiva y cuantificable a partir de un método sencillo y económico de implementar.

39 El Net Promoter Score o NPS es una herramienta que sirve para medir la satisfacción de los clientes a partir de una sola pregunta. Determina el grado en que una persona sería capaz de recomendarle a otra persona (familiar, amigo, colega) cierto servicio o producto.

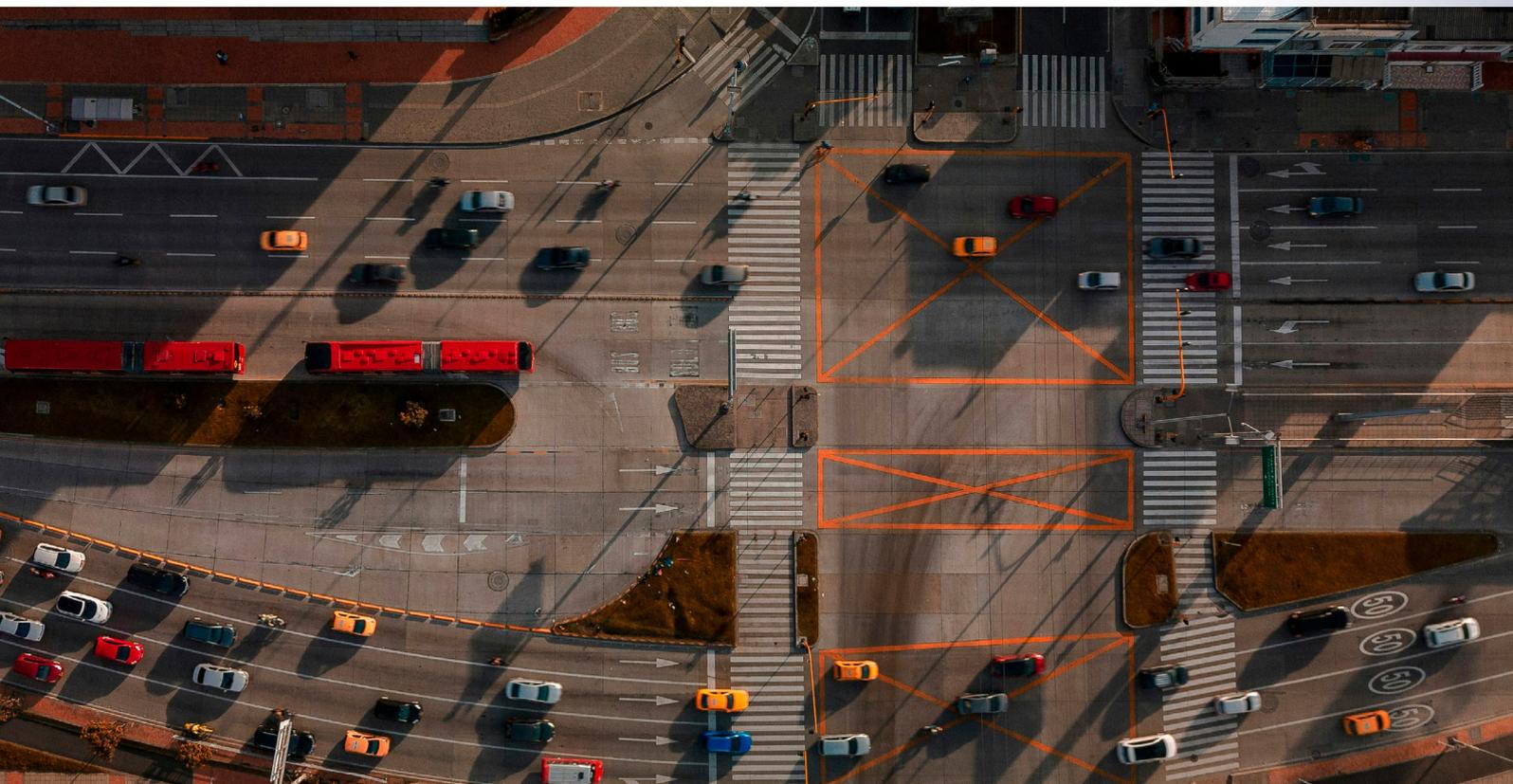
## Escalabilidad y replicabilidad del piloto en otras ciudades de la región

El piloto presentado ha desarrollado una solución tecnológica modular que puede ser utilizada por empresas del sector de transporte de carga y por organizaciones provenientes del sector público. Es importante destacar que, si bien se ha completado el proyecto piloto y su evaluación, será necesario planificar una tercera fase para llevar adelante su implementación a escala operativa.

No obstante, dado que la metodología diseñada y el código desarrollado son públicos, las ciudades o empresas de la región que estén interesados en replicarlo, podrían acceder a ellos y adaptarlos de acuerdo a sus necesidades.

Los insumos técnicos y teóricos que deja este proyecto piloto pueden beneficiar al sector público ya que, entre otras cosas, le permiten conocer con más detalle la relación entre la condición técnico-mecánica de los vehículos de carga que circulan en las ciudades y las emisiones que generan. Esto puede promover el desarrollo de instrumentos novedosos que generen incentivos. Además, las metodologías de cálculo de emisiones y promoción de cambios de comportamiento por medio de la ludificación son ajustables a otros modos de transporte. Por lo tanto, podrían apoyar la implementación de proyectos de cobro por externalidad o asociar esquemas de incentivos al desempeño de conductores en los sistemas de transporte público.

En cuanto a las empresas del sector de transporte de carga, replicar este piloto les permitiría tener una planificación más sostenible de su logística, monitorear sus emisiones, evaluar la eficacia del mantenimiento técnico-mecánico que reciben sus vehículos, y medir impacto y premiar la aplicación exitosa de estrategias de conducción sostenible. Además, se podrían modelar decisiones de inversión en gasto energético y mecanismos de medición directos para la evaluación de alternativas de transición tecnológica de la flota.



CAPÍTULO 4

Epílogo



**A** lo largo de la publicación se ha destacado la importancia de trabajar en proyectos que tengan como objetivo monitorear y reducir las emisiones que contaminan el aire, ya que impactan directamente en la salud y bienestar de nuestras ciudades y sus habitantes. A partir de la presentación de tres proyectos piloto, se ha dejado en evidencia que la tecnología cívica aplicada a la calidad del aire puede promover la transparencia al cerrar brechas de información. Esto le permite a los ciudadanos tomar decisiones informadas para proteger su salud, modificando sus comportamientos y reduciendo la exposición al aire contaminado. Además, la tecnología cívica aplicada a la calidad del aire puede desempeñar un rol importante en la concientización de la sociedad. Si se utiliza para informar y educar sobre los efectos perjudiciales de la contaminación del aire en la salud y el medio ambiente, puede llegar a impulsar la adopción de conductas más sostenibles y responsables por parte de la comunidad.

Cada uno de los proyectos piloto incluidos en la publicación ilustra una perspectiva diferente en la utilización de datos. El primero enfatiza la transparencia y el conocimiento, promoviendo la apertura y la visibilidad de información para que la ciudadanía tome decisiones informadas sobre rutas con mejor calidad de aire. El segundo caso se centra en un cambio tecnológico, utilizando datos para analizar las emisiones evitadas, monitorear la calidad del aire, y conocer la percepción de los actores de logística y de los usuarios del espacio público. Por último, el tercer caso destaca la participación de actores privados y la gamificación o ludificación, demostrando cómo la tecnología puede aprovechar la colaboración con el sector privado y la aplicación de elementos lúdicos para motivar un cambio de comportamiento de los conductores de transporte de carga.

Los tres proyectos piloto presentados exploran diversas oportunidades de aplicar la tecnología cívica en la movilidad urbana y el transporte con el objetivo de monitorear la calidad del aire e informar a los ciudadanos. Por lo tanto, se espera que esta publicación resulte altamente beneficiosa para otras ciudades de la región que enfrentan desafíos similares, sirviendo de fuente de inspiración a través de ejemplos concretos, con el fin de fomentar la planificación de entornos urbanos más sostenibles, saludables y agradables para sus habitantes.



