Proyecto Ciclovías Inteligentes y Transporte Sostenible en la RMS

Producto 4

Plan de Monitoreo de Contaminantes Enfocado en la Red de Ciclovías

INFORME FINAL

Consultor responsable: Mauricio Osses Alvarado

Colaboradores:

Mei-ling Loo Oyarzún

Sebastián Diez

Bogdan Gjuranovic

Charly Monsalve

23 de noviembre de 2023

Índice de Contenidos

1 Resumen ejecutivo 5
2 Introducción 6
2.1 Objetivo General 7
2.2 Objetivos Específicos 7
3 Calidad del Aire y Exposición de Usuarios a Contaminantes 8
3.1 Contaminantes Relevantes 8
3.1.1 Material Particulado (MP) 8
3.1.2 Óxidos de Nitrógeno (NOx) 9
3.1.3 Ozono (O_3) 10
3.1.4 Carbono Negro 10
3.2 Análisis de Redes Existentes 11
3.2.1 Análisis Red SINCA 11
3.2.2 Nomenclatura sugerida para informar niveles de concentración 11
3.2.3 Análisis UOCT 13
3.3 Sensores de Bajo Costo para Calidad de Aire 14
3.3.1 Tecnologías Disponibles 16
3.3.2 Control y Aseguramiento de la Calidad (QA/QC) y Calibración 18
3.3.3 Instalación: Aspectos a Considerar 20
3.3.4 Uso de Sensores en el Mundo 20
3.4 Dispositivos para Conteo de Vehículos 23
3.4.1 Descripción de YOLO 24
3.4.2 Dispositivo GPU de Bajo Costo 25
4 Emisiones Vehiculares y su Impacto 27
4.1 Emisiones Vehiculares en Chile y la Región Metropolitana de Santiago 27
4.2 Exposición a Contaminantes para Usuarios de Distintos Modos de Transporte 28
4.2.1 Revisión de Estudios Internacionales 29
4.2.2 Exposición de Ciclistas a Material Particulado y Carbono Negro en Santiago 29
4.2.3 Impacto del Diseño de Ciclovías en la Exposición de Usuarios 32
4.3 Análisis Redes de Ciclovías y Potenciales Usuarios en Santiago 34
4.3.1 Análisis Encuesta Origen Destino Gran Santiago 35
4.3.2 Mayor Densidad Poblacional 36
4.3.3 Mayor ICVU 37
4.3.4 Menor ICVU 37
4.3.5 Mayor Infraestructura Disponible 38
4.4 Análisis de Viajes Cortos en Encuesta Origen-Destino Gran Santiago 38

5 Selección de Puntos de Medición para Monitoreo 40
5.1 Nivel 1: 50 Puntos....46
5.2 Niveles 2 y 3: 100 y 150 Puntos....49
5.3 Listado Niveles 1, 2 y 3 52
6 Costos Dispositivos Electrónicos....56
6.1 Sistemas de Calidad de Aire 56
6.1.1 Costos Sistemas Llave en Mano....56
6.1.2 Costos por Componentes Individuales 57
6.2 Costos Contador de Vehículos 59
6.3 Sistemas de Calidad de Aire y Contador de Vehículos....60
6.4 Anexos Estimación de Costos....63
6.4.1 Anexo 1: Cotización Kunak....63
6.4.2 Anexo 2: Cotización QuantAQ....67
6.4.3 Anexo 3: Cotización AQMesh....68
6.4.4 Anexo 4: Cotización Clarity 69
6.4.5 Anexo 5: Cotización Entel 70
6.4.6 Anexo 6: Cotización Ametek 71
6.4.7 Anexo 7: Cotización AliExpress 72
7 Referencias 73

Índice de Figuras

Figura 1: Propuesta de colores EPA-AQI....12
Figura 2: Número y estado de cámaras y espiras por comuna 14
Figura 3: Número y estado de cámaras y espiras por comuna 14
Figura 4: Ejemplo de los componentes de un sensor de bajo costo. (World Meteorological Organization, 2020) 16
Figura 5: Esquema de los niveles de validación en sensores. (World Meteorological Organization, 2020) 19
Figura 6: Representación del Funcionamiento del Algoritmo YOLO. 25
Figura 7: Prototipo del Dispositivo GPU. 26
Figura 8: Distribución de emisiones NOx generadas por fuentes móviles para el año 2020. 28
Figura 9: Ciclovías recorridas clasificadas por tipo y su longitud total. (Salvatierra, 2016) 30
Figura 10: Ciclovías seleccionadas para el estudio. (Salvatierra, 2016) 30
Figura 11: Resumen de Ciclovías Seleccionadas. (Gutiérrez G. , 2023)....32
Figura 12: Kilómetros de ciclovías existentes por cada 100.000 habitantes. (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, s.f.)....34
Figura 13: Selección de puntos en tres niveles 40
Figura 14: Comunas Gran Santiago. 41

Figura 15: Sectores MODEM, agrupación de las 34 comunas, Gran Santiago. 42
Figura 16: Espiras UOCT según su estado de operación, red de ciclovías y sectores MODEM.....43
Figura 17: Cámaras UOCT según su estado de operación, red de ciclovías y sectores MODEM. 44
Figura 18: Espiras UOCT según coincidencia con ciclovías, red de ciclovías y sectores MODEM. 45
Figura 19: Cámaras UOCT según coincidencia con ciclovías, red de ciclovías y sectores MODEM. 45
Figura 20: Criterios para el nivel 1; red de ciclovías existentes, emisiones NOx y sectores MODEM. .47
Figura 21: Flujo vehicular total en horario fuera de punta y sectores MODEM. 48
Figura 22: Flujo vehicular total en horario punta mañana y sectores MODEM.....48
Figura 23: Mediciones realizadas en estudios anteriores y sectores “MODEM”.....49
Figura 24: Ciclovías metropolitanas, intercomunales y comunales en desarrollo a corto plazo y sectores “MODEM”.....50
Figura 25: Escalabilidad de la red de monitoreo, ciclovías existentes, ciclovías corto plazo y sectores “MODEM”. 51
Figura 26: Escalabilidad de la red de monitoreo, ciclovías existentes, ciclovías corto plazo y comunas Gran Santiago. 51
Figura 27: Cotización Kunak página 1 de 8. 63
Figura 28: Cotización Kunak página 2 de 8. 63
Figura 29: Cotización Kunak página 3 de 8. 64
Figura 30: Cotización Kunak página 4 de 8. 64
Figura 31: Cotización Kunak página 5 de 8. 65
Figura 32: Cotización Kunak página 6 de 8. 65
Figura 33: Cotización Kunak página 7 de 8. 66
Figura 34: Cotización Kunak página 8 de 8. 66
Figura 35: Cotización QuantAQ. 67
Figura 36: Cotización AQMesh página 1 de 2. 68
Figura 37: Cotización AQMesh página 2 de 2. 68
Figura 38: Cotización Clarity. 69
Figura 39: Cotización Entel. 70
Figura 40: Cotización Ametek. 71
Figura 41: Cotización AliExpress. 72

Índice de Tablas

Tabla 1: Tecnologías disponibles OEM. (MDPI, 2019) 17
Tabla 2: Tecnologías disponibles SSys. (MDPI, 2019) 18
Tabla 3: Sectorización "MODEM" 43
Tabla 4: Listado de los 150 puntos, indicando el nivel, sus coordenadas y comuna a la cual pertenecen.....55
Tabla 5: Costos de adquisición más valores de operación del primer año para los proveedores estudiados.....57
Tabla 6: Costo de adquisición para completar niveles 1, 2 y 3 (CLP sin IVA) 57
Tabla 7: Costos asociados al montaje de los sensores por componentes individuales. 59
Tabla 8: Costos del contador de vehículos dentro de un horizonte de evaluación de 5 años.....59
Tabla 9: Costos asociados al contador de vehículos.....59
Tabla 10: Costos del contador de vehículos dentro de un horizonte de evaluación de 5 años.....60
Tabla 11: Costo de adquisición para completar niveles 1, 2 y 3 (CLP sin IVA) 60

Tabla 12: Costos del sistema de calidad de aire por componentes sumado al sistema de conteo de vehículos. 61
Tabla 13: Costos del sistema de calidad de aire por componentes sumado al sistema de conteo de vehículos, considerado niveles de red 1, 2 y 3 (CLP sin IVA) 61

1 Resumen ejecutivo

La exposición a los contaminantes atmosféricos de los usuarios de transporte en la Región Metropolitana de Santiago proviene principalmente de residuos de combustión emitidos por vehículos motorizados. Entre los compuestos que afectan directamente la salud predominan el material particulado fino ($MP_{2.5}$) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), los cuales provienen principalmente de motores diésel, especialmente camiones y buses no pertenecientes al sistema de transporte público RED. También es importante mencionar el ozono (O_3), el cual no se emite directamente, sino que se forma de manera secundaria en la atmósfera, a partir de emisiones directas de óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos volátiles orgánicos (COV) y radiación solar. Los niveles de exposición a los que se encuentran expuestos los usuarios de ciclovías dependen de muchos factores, tales como el encajonamiento del aire por edificios, la presencia de árboles como barrera del tráfico aledaño, la dirección del viento en relación a los vehículos motorizados que circulan cerca, el tipo y cantidad de vehículos que comparten la calle con la ciclovía y el nivel de esfuerzo del ciclista en términos de inhalación. Esto dificulta usar como referencia las mediciones de concentraciones medias de contaminantes sobre la ciudad, reportadas diariamente por las estaciones oficiales de monitoreo de calidad del aire (SINCA), para asociarlas con la exposición directa a contaminación de los usuarios en las calles. Para tener información más específica de lo que inhalan los usuarios de transporte urbano se propone una red de monitoreo que combine mediciones continuas de calidad de aire e identificación de vehículos motorizados y bicicletas sobre la red de ciclovías, con dispositivos sofisticados, pero de bajo costo, dotados de algoritmos de análisis de acceso gratuito. Esta red de monitoreo debe tener la capacidad de integrarse con redes existentes, específicamente SINCA y UOCT, de manera complementaria y respetando las diferencias de precisión y objetivos de cada sistema. Se proponen tres redes de monitoreo, con 50, 100 y 150 puntos de control respectivamente, sobre las redes de ciclovías existentes y proyectadas para construcción, aprovechando al máximo las instalaciones de cámaras y espiras de conteo gestionadas por UOCT. Además, se incluye una estimación de costos para cada caso (medición de exposición a contaminantes y conteos vehiculares), considerando distintas alternativas de dispositivos y esquemas comerciales disponibles en el mercado. Finalmente, se proponen combinaciones de sensores para optimizar recursos y esquemas de información al público, aprovechando la información generada.

2 Introducción

Con el fin de implementar acciones sustentables de movilidad, en el marco del programa Santiago Conectado y el desarrollo del Centro de Gestión Integrada de Información Regional, el GORE RMS ha firmado un convenio de colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) mediante la Oficina de las Naciones Unidas para la Cooperación Sur-Sur (UNOSSC). El objetivo es implementar un modelo de "Ciclovías Inteligentes y Transporte Sostenible para la RM", todo en el marco del "Cities Project", que busca generar intercambio de capacidades técnicas y buenas prácticas entre Hangzhou (China) y Santiago (Chile) para promover un transporte sostenible, inteligente y bajo en emisiones contaminantes.

Específicamente, el proyecto considera tres líneas de acción:

1. Desarrollo de un análisis detallado del estado del sistema de transporte regional metropolitano y elaboración de pautas técnicas sobre una red de transporte inteligente y planificada.
2. Aumento de la valoración social del transporte sostenible y fortalecimiento de las capacidades institucionales del gobierno regional y de los y las profesionales encargados de la gestión del transporte.
3. Promoción del grupo de Cooperación Sur-Sur de Ciudades sobre Transporte Sostenible y Calidad del Aire, y fomento de los intercambios y relaciones entre ciudades para compartir experiencias.

Los productos esperados a partir de esta colaboración son los siguientes:

Producto 1: Diseño e implementación de Entrevistas a actores locales clave para identificar brechas y necesidades del sistema de transporte urbano y de su modelo de gobernanza.

Producto 2: Diagnosticar la RM en base al modelo de Hangzhou y realizar una propuesta metodológica para implementar un sistema de transporte público inteligente en el marco de lo que será la Autoridad Metropolitana de Transporte.

Producto 3: Propuesta técnico-metodológica para Estrategia de Big Data para apoyar, al GORE RMS, en la transformación de la actual red de ciclovías en una Red Ciclista Inteligente.

Producto 4: Desarrollar un Plan de monitoreo de contaminantes enfocado en la red de ciclovías, entregando la información de la calidad del aire a través de plataformas digitales de acceso público.

Producto 5: Diseño de la implementación de dispositivos de captura de datos en transportes y sus contaminantes en la red de ciclovías del Gran Santiago.

Producto 6: Desarrollar página web de difusión del proyecto y de las iniciativas del DMTT GORE RMS.

El presente documento corresponde al desarrollo del Producto 4.

2.1 Objetivo General

El producto 4 requiere la elaboración de una propuesta técnica-metodológica para desarrollar un plan de monitoreo de emisiones atmosféricas enfocado en la red de ciclovías, entregando la información de la calidad del aire a través de herramientas y plataformas digitales en Santiago.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis exhaustivo del estado actual del monitoreo de la calidad del aire en la región: estaciones (forma, capacidad de medición de los sensores, radio de medición, etc.), planes, modelo de gobernanza asociado, recursos humanos y tecnológicos, brechas y necesidades, zonas más contaminadas, entre otros. Estado del arte en otras ciudades.
- Poder medir y desagregar las emisiones que provienen del sector transporte por modo motorizado en diversos puntos de la RMS asociados a la red del PMC (emisiones de buses, de vehículos, motos, etc., a diversas horas del día y momentos del año).
- Proponer un plan de monitoreo que se integre a las redes de monitoreo existentes (RED SINCA y UOCT) para fortalecer la red en curso y mejorarla en base al objetivo principal: ya sea con equipos nuevos, agregando tecnología y nuevos sensores o alguna alternativa que la consultoría según su experiencia considere pertinente.
- Proponer equipos, realizar cotizaciones y proponer plan de implementación y difusión de la información a la ciudadanía (etapas, actores, modelo de gestión, plataformas, etc.).

3 Calidad del Aire y Exposición de Usuarios a Contaminantes

Este capítulo se subdivide en tres secciones: contaminantes relevantes, análisis de redes existentes y sensores de bajo costo. Estas secciones responden a la recomendación de compuestos a considerar para el monitoreo de contaminantes, la información disponible ofrecida por servicios públicos y las tecnologías emergentes disponibles en el mercado que complementen los sistemas tradicionales.

Los contaminantes relevantes para determinar el nivel de exposición de usuarios del transporte son material particulado fino (MP2.5) y dióxido de nitrógeno (NO2). También son relevantes el ozono (O3) y carbono negro (BC), pero el primero (O3) es esencialmente fotoquímico y el segundo (BC) es difícil de medir con sensores de bajo costo.

Las redes públicas existentes son las mediciones de calidad del aire reportadas por SINCA y la red de cámaras gestionadas por UOCT. Estos sistemas son de alto interés para comprender la concentración de contaminantes sobre la ciudad (SINCA) y conocer el estado del tráfico en la ciudad (UOCT). No obstante, sus diseños y objetivos no se ajustan específicamente a los requerimientos del proyecto marco “Ciclovías Inteligentes y Transporte Sostenible para la RM”.

Para complementar la información desplegada por SINCA y UOCT se exploran distintas tecnologías emergentes en el mercado, que permitan un despliegue masivo a bajo costo (comparado con las opciones tradicionales). Para ello, se analizan sensores de calidad de aire y métodos de reconocimiento de imágenes con inteligencia artificial.

3.1 Contaminantes Relevantes

Es esta sección se presentan los contaminantes principales a identificar en el estudio con el fin de poder definir, más adelante en el informe, cuáles serán las tecnologías para medir las concentraciones de estos. Cabe mencionar que se definió también el carbono negro, si bien este contaminante no se considerará en el estudio, es pertinente mencionarlo puesto que en estudios de referencia (véase sección 4.2.2 y sección 4.2.3) se menciona y es importante conocer su composición y sus efectos en la salud.

3.1.1 Material Particulado (MP)

El material particulado es una mezcla de partículas sólidas o líquidas en suspensión en el aire. Pueden ser naturales, como el polvo del suelo o el polen, o artificiales, como el humo de combustión

o las emisiones industriales. El tamaño de las partículas varía desde pequeñas moléculas hasta partículas visibles a simple vista. El material particulado puede tener efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente.

Las **partículas MP10** son partículas con diámetros inferiores a 10 micrómetros (µm), es decir, son partículas muy pequeñas que pueden ser inhaladas y llegar a los pulmones. El tamaño de las partículas MP10 es lo suficientemente pequeño como para penetrar en las vías respiratorias y causar problemas de salud. Estas partículas pueden provenir de diversas fuentes, como la erosión del suelo, la vegetación, la quema de combustibles fósiles, la industria y el tráfico vehicular. El material particulado MP10 se considera como un contaminante atmosférico ya que tiene un impacto negativo en la salud humana y en el medio ambiente.

Las **partículas MP2.5** son partículas con diámetros inferiores a 2.5 micrómetros (µm), son aún más pequeñas que las MP10. Estas partículas son especialmente peligrosas porque son lo suficientemente pequeñas como para penetrar profundamente en los pulmones y causar problemas respiratorios. Algunas de las fuentes de MP2.5 incluyen la combustión de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, la industria, el tráfico vehicular, la agricultura, y la quema de residuos. A diferencia de las MP10, las MP2.5 pueden ser emitidas por fuentes naturales, como el polvo del desierto o el humo de incendios forestales.

Las **partículas MP1.0** son partículas con diámetros inferiores a 1.0 micrómetros (µm), son aún más pequeñas que las MP2.5 y MP10. Estas partículas son las más finas y pueden penetrar en los pulmones con mayor facilidad, causando problemas respiratorios y cardiovasculares.

Algunas de las fuentes de MP1.0 incluyen la combustión de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, la industria, el tráfico vehicular, la agricultura, y la quema de residuos. También pueden tener origen natural como la erosión del suelo, la vegetación, el polen, cenizas volcánicas, entre otros.

3.1.2 Óxidos de Nitrógeno (NOx)

El NOx es un término genérico que hace referencia a un grupo de gases muy reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones.

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando se quema combustible. Las principales fuentes de NOx son los automóviles, las centrales eléctricas y otras fuentes industriales, comerciales y domésticas que queman combustibles.

En la atmósfera, los óxidos de nitrógeno pueden contribuir a la formación de ozono fotoquímico (smog o niebla contaminante) y tener consecuencias para la salud. También contribuye al calentamiento global y puede provocar lluvia ácida.

El **óxido nítrico (NO)** es el compuesto de nitrógeno que se emite directamente a la atmósfera con mayor frecuencia. En el aire ambiente exterior, el óxido nítrico (NO) emitido por los automóviles se combina con el oxígeno presente en la atmósfera por la acción de la luz solar, produciendo **dióxido de nitrógeno (NO2)**, que es uno de los mayores contaminantes del aire.

3.1.3 Ozono (O_3)

Este gas tiene presencia en dos niveles atmosféricos diferentes, mostrando en cada uno de ellos un comportamiento diferente:

- La estratosfera, capa situada entre los 10-12 [km] y los 50 [km] a partir de la superficie terrestre. En esta zona, la capa de ozono filtra la mayor parte de la radiación ultravioleta o radiación UV, evitando que llegue a la Tierra y ocasione daños sobre el ser humano y otras formas de vida. En esta capa, el O_3 se forma por efecto de la radiación solar, que rompe las moléculas de oxígeno (O_2), recombinándose en O_3.
- La troposfera, la capa localizada justo debajo de la estratosfera, es decir, entre la superficie de la Tierra y los 10-12 [km]. El ozono presente en este nivel se forma por reacciones fotoquímicas de compuestos atmosféricos que son emitidos tanto por fuentes naturales como antropogénicas. Es decir, el ozono troposférico es un contaminante secundario que en concentraciones elevadas resulta perjudicial para la salud humana y los ecosistemas naturales.

3.1.4 Carbono Negro

El carbono negro es una forma de carbono que se caracteriza por su alto contenido de carbono elemental y su baja reflectividad. Se encuentra en forma de pequeñas partículas y es comúnmente producido por la combustión incompleta de material orgánico, como el carbón, el petróleo y el gas natural. El carbono negro tiene un alto poder de absorción de la radiación infrarroja, lo que lo hace un importante contribuyente al efecto invernadero. También puede tener efectos negativos en la salud humana si se inhala en grandes cantidades.

El carbono negro se produce a través de la combustión incompleta de material orgánico, como el carbón, el petróleo, el gas natural y la biomasa. También puede ser producido por procesos industriales, como la síntesis química, la metalurgia y la producción de cemento. En la combustión incompleta, el combustible no quema completamente y emite pequeñas partículas de carbono elemental, que se condensan y forman partículas de carbono negro. También puede ser producido por la reacción química de compuestos orgánicos con compuestos inorgánicos en la atmósfera, como el óxido nitroso y el dióxido de azufre

El carbono negro tiene varios efectos negativos en el medio ambiente. Uno de los efectos más importantes es su contribución al efecto invernadero. El carbono negro es un excelente absorbedor de radiación infrarroja, lo que significa que atrapa el calor del sol en la atmósfera y contribuye al aumento de la temperatura global. Además, el carbono negro puede contribuir a la formación de nubes bajas y niebla, lo que puede reducir la cantidad de luz solar que llega al suelo y afectar negativamente a la producción de cultivos.

Otro efecto negativo del carbono negro es su impacto en la salud humana. Cuando el carbono negro se inhala, puede causar problemas respiratorios, como asma y bronquitis. También se ha relacionado con enfermedades cardíacas y cánceres de pulmón. El carbono negro también puede afectar negativamente a la vida silvestre, ya que puede matar a los peces y otras criaturas acuáticas y dañar el hábitat de los animales terrestres.

3.2 Análisis de Redes Existentes

3.2.1 Análisis Red SINCA

El Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire (SINCA) del Ministerio del Medio Ambiente tiene como objetivo entregar información de calidad de aire de todo el país para mejorar el conocimiento, la vigilancia y la gestión de la calidad del aire existente en el país. De esta manera, en el portal mencionado se encontrarán mediciones de calidad del aire en línea, seguimiento histórico de las mediciones de calidad del aire y meteorología, antecedentes de las estaciones de monitoreo, documentación relacionada con calidad de aire y monitoreo y enlaces a sitios web de interés, nacional e internacionales.

La información que se presenta agrupada en 3 categorías diferentes:

- Registros no validados: Corresponde a la información recibida en línea, de forma automática, desde las estaciones de monitoreo que se encuentren conectadas al sistema.
- Registros preliminares: Corresponden a datos validados en una primera instancia, efectuada por los operadores de la estación donde se corrigen los datos desfasados o se eliminan aquellos que corresponden a fallas o mantenciones como las calibraciones de los instrumentos.
- Registros oficiales: Corresponden a los datos validados previamente por los operadores de las estaciones, que pasan por un segundo proceso de validación por algún organismo estatal que tenga competencia sobre los datos.

Es importante mencionar que los registros no validados o registros preliminares no pueden ser utilizados para la verificación de la normativa vigente, sino que únicamente como referencia al estado de la calidad del aire, debiendo confirmar la información acá presentada, con la autoridad competente que corresponda.

Por consiguiente, mediante el portal de la red del MMA se pueden extraer los datos validados de las concentraciones de material particulado para todos los días y horas de cada año. Los datos seleccionados se pueden ordenar de manera cronológica, con el fin de realizar un análisis estadístico de intervalos de confianza con una certeza del 95%.

3.2.2 Nomenclatura sugerida para informar niveles de concentración

En un esfuerzo por hacer accesible y comprensible la información sobre la calidad del aire para los habitantes de Santiago, se propone utilizar un sistema de nomenclatura basado en una gama de colores. Este sistema debería equilibrar la necesidad de información clara y directa con las limitaciones y las incertidumbres inherentes a los sensores de bajo costo para PM2.5 y NOx.

Esta forma de informar a la población tiene un uso extendido a través de los índices de calidad del aire (ICA o AQI)[1], los cuales tienen equivalencia con el Índice de Calidad de Aire referido a Partículas (ICAP), según D.S. Nº 59/1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. Este decreto supremo establece la Norma de Calidad Primaria para Material Particulado Respirable MP10 y en especial los niveles que definen situaciones de Emergencia Ambiental.

Bueno: 0-99, Regular: 100-199, Alerta: 200-299, Premergencia: 300-499, Emergencia: 500-superior

ICAP 100 = 150 μg/m^{3}N MP10 24 horas, ICAP 500 = 330 μg/m^{3}N MP10 24 horas

La propuesta de EPA para asignar colores a los diferentes Air Quality Index (AQI) se muestra en la figura siguiente:

AQI Numbers	Colors
0 to 50	Green
51 to 100	Yellow
101 to 150	Orange
151 to 200	Red
201 to 300	Purple
301 to 500	Maroon

Figura 1: Propuesta de colores EPA-AQI

Otro sistema que podría considerarse es el propuesto por UNEP[2], el cual considera los niveles de cumplimientos con los niveles guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud.

Estos es solo ejemplos, debiendo la decisión final consultarse con expertos en comunicación y percepción de riesgos, además de consensuar cualquier acción con otros actores (por ejemplo, la red SINCA, que dispone de una escala propia), utilizando términos y colores distintivos. Además, esto debería ir acompañado de campañas de educación que expliquen el significado de cada color y cómo actuar en consecuencia, pero además que ayude a informar a los usuarios sobre las limitaciones y las posibles incertidumbres de los datos recopilados por sensores de bajo costo.

[1] https://www.airnow.gov/education/students/what-is-the-aqi/#:~:text=AQI%20Colors&text=The%20colors%20tell%20you%20how,green%2Cthe%20air%20is%20clean
[2] https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/

3.2.3 Análisis UOCT

La Unidad Operativa de Control de Tránsito, UOCT, se dedica a optimizar la gestión de tránsito en las principales ciudades del país, a través de la administración y la operación de sistemas inteligentes de transporte y el mejoramiento de los sistemas de información, para facilitar las condiciones de desplazamiento de las personas. Su objetivo es administrar y operar los sistemas de control de modo de optimizar permanentemente las condiciones de tránsito en las principales ciudades, así como de otros sistemas inteligentes de apoyo a la gestión de tránsito, como son los circuitos cerrados de televisión, letreros de mensajería variable, entre otros.

Los sistemas de control monitorean en tiempo real la operación de la mayoría de los semáforos existentes en las ciudades por medio de una red de comunicaciones que conecta cada semáforo con el sistema de control. Además, la UOCT opera también un conjunto de cámaras de monitoreo de tráfico.

Dentro del portal transporTeinforma (SIT-UOCT, s.f.), en la sección “Planifica tu viaje”, se entrega información de las vías del área Metropolitana. En particular, se entrega un mapa interactivo, en donde se puede identificar las vías reversibles de mañana y tarde (vías que varían su sentido de tránsito en determinados períodos del día), como también las pistas exclusivas (pistas cuyo uso está destinado únicamente a la circulación del transporte público) y pistas sólo buses (pistas de la calzada destinadas al uso exclusivo de buses de transporte público). Esta información también puede ser revisada en un listado detallado que entregan dentro de la misma sección.

Sumado a esto, el portal cuenta con una sección de tiempos de viaje, en donde se identifican tramos dentro del área Metropolitana y se clasifican de acuerdo a la cantidad de tráfico existente en tiempo real, además de entregar el tiempo estimado de recorrido. Estos se clasifican en tráfico fluido (color verde), tráfico ligero (color amarillo), tráfico moderado (color rojo).

Además, en la sección “Ciclovías” del portal se entrega un mapa interactivo con las ciclovías actuales del área metropolitana, donde además por cada tramo de ciclovía se detalla información como el tipo de ciclovía (ej. Bandejón o vereda), el sentido, y su extensión. Dentro de esta misma sección se entregan también enlaces directos a plataformas (BiciMapa, Bicineta, Chilebikes) que permiten al usuario trazar recorridos de acuerdo si busca una ruta más segura o directa, ubicación de talleres, estacionamientos, etc.

UOCT cuenta con espiras y cámaras repartidas sobre Santiago, las cuales se indican en las Figuras 16 y 17 respectivamente. Algunos de estos dispositivos se encuentran funcionando y otros fuera de servicio, como se indica en la figura siguiente:

Instrumento UOCT	Estado	Cantidad
Cámara	Operativa	256
	No Operativa	54
Espira	Operativa	72
	No Operativa	92

Figura 2: Número y estado de cámaras y espiras por comuna

Considerando su ubicación es posible determinar la distribución comunal de estos dispositivos, lo que se indica en la figura siguiente:

Cantidad Cámaras	Cantidad Comunas
0	6
1-5	13
6-10	4
11 o más	11

Cantidad Espiras	Cantidad Comunas
0	16
1-5	11
6-10	3
11 o más	4

Figura 3: Número y estado de cámaras y espiras por comuna

Esta información ha sido tomada en cuenta para la selección de puntos de las redes propuestas sobre las ciclovías, lo que se indica en el Capítulo 5.

3.3 Sensores de Bajo Costo para Calidad de Aire

Los sensores de bajo costo para la medición de contaminantes atmosféricos son una tecnología que promete avances revolucionarios en el monitoreo de la calidad de aire. Gracias a su resolución

temporal y espacial, tienen la potencialidad de proveer respuestas a una variedad de aplicaciones y usuarios finales.

Aunque menos precisos que los instrumentos de referencia (ej. Instrumentación de la red SINCA), estos sensores son más económicos, pequeños, livianos y tienen un menor consumo energético. Además, el empleo de instrumentos de referencia es complejo (y algunas veces no es posible de implementar por los costos o por falta de infraestructura), como por ejemplo al monitorear en áreas remotas sin acceso a fuentes de energía o para evaluar la exposición del personal a contaminantes ambientales.

Actualmente, estos sensores son una herramienta que se ha comenzado a emplear en la investigación académica y está dando sus primeros pasos en la vigilancia reglamentaria[3]. Pero además han servido para despertar interés público, a saber, usuarios particulares, gobiernos y empresas. Sin embargo, es importante recordar que estos dispositivos tienden a ser menos sensibles, menos precisos y específicos respecto a la naturaleza química del compuesto o la variable de interés.

Las actividades de calibración y validación, tanto proactivas como reactivas, siguen siendo un componente esencial de la operación de los sensores de bajo costo. Lo ideal sería que los usuarios procuraran situar los sensores de bajo costo cerca de instrumentos de referencia, y así poder compararlos. Es también importante remarcar que se optimiza la calidad de los datos de los sensores cuando se calibran en condiciones medioambientales similares a las del lugar en el que se pretende utilizar.

Los sensores pueden ser clasificados en dos grandes categorías: sensores que miden concentraciones de gas (ej. NO_x (NO_2, NO), O_3, CO y SO_2), y sensores que miden concentración de masa material particulado o MP (ej. MP_{10}, $MP_{2.5}$, $MP_{1.0}$).

Usualmente, los sistemas de estos sensores están compuestos por algunos elementos básicos que incluyen las siguientes funcionalidades: (a) un elemento sensor que consiste en un material activo que absorbe especies gaseosas dispersas en el aire, (b) un transductor que convierte la información del sensor en la señal eléctrica de salida, (c) una unidad de cómputo y almacenamiento de datos con capacidad vinculada a un dispositivo de comunicación (transmisor o celular) y (d) una fuente de energía.

[3] https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox

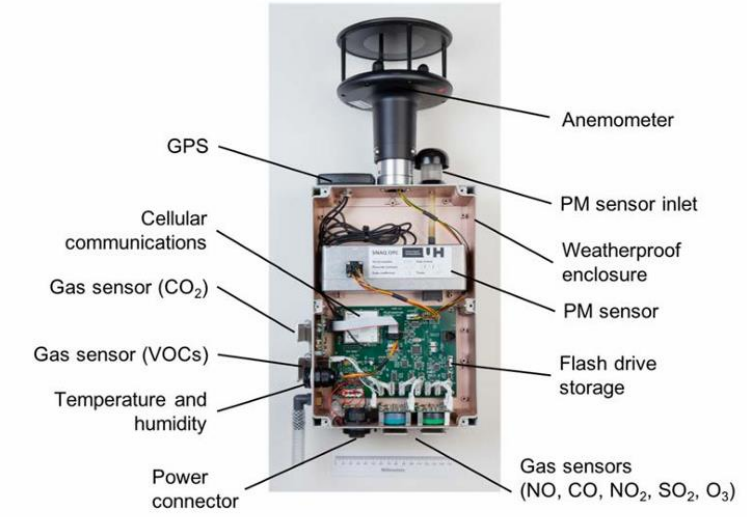


Figura 4: Ejemplo de los componentes de un sensor de bajo costo. (World Meteorological Organization, 2020)

Los sensores de gas más populares en el mercado se basan en dos principios principales de transducción:

- Celdas electroquímicas y óxidos de metal: Interacciones químicas entre los materiales sensores (óxidos de metal, catalizadores y polímeros conductores) y gases tales como dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), compuestos orgánicos volátiles (VOCs) individuales o totales.
- Sensores ópticos: Absorción de luz visible (ej. O_3), longitudes de onda infrarrojas (ej. CO_2), o quimioluminiscencia (NO_2). Además, el material particulado (MP) puede ser medido mediante cambios de frecuencia de un dispositivo oscilador o mediante dispersión de luz provocada por el tamaño y concentración de masa de partículas a medir.

3.3.1 Tecnologías Disponibles

Para la clasificación y el entendimiento de la implementación de sensores, se debe distinguir entre, los detectores del sensor, que son producidos por los fabricantes del equipo (**OEM** con sus siglas en inglés) y el sistema completo del sensor (**SSys** con sus siglas en inglés), que incluye el OEM además de una caja de protección, un sistema de muestreo, hardware, un software para la adquisición de datos, un conversor de datos análogos a digitales, tratamiento de datos y transferencia de datos.

Las tecnologías disponibles de OEM, con sus precios actuales (2023), son las siguientes:

Modelo	Contaminante	Precio (EUR)
TGS-5042	CO	40
CO-B4	CO	160

CO 3E300	CO	250
DiscMini	MP	11.400
DN7C3CA006	MP2.5	65
DSM501A	MP2.5	10
PMS5003	MP2.5	30
ZH03A	MP2.5	25
PMS1003	MP2.5	45
PMS7003	MP2.5	25
PMS3003	MP2.5	20
GP2Y1010AU0F	MP2.5, MP10	20
O3-3E1F	O3	500
NO-B4	NO	280
NO2-A1	NO2	300
NO2-B4	NO2	280
NO2-B43F	NO2	280
NO2-3E50	NO2	500
MiCS-4514	CO, NO2	20

Tabla 1: Tecnologías disponibles OEM. (MDPI, 2019)

Por otro lado, las tecnologías disponibles de SSys, con sus precios actuales (2023), son las siguientes:

Modelo	Contaminante	Precio (EUR)
AQT410 v.1.11[4]	O3	3.700
2B Tech. (POM)	O3	6.200
CairClip NO2-F	NO2	1.000
Smart Citizen Kit	CO	115
CanarIT[5]	MP	1.500
AirBeam	MP2.5	240
AirVisual Outdoor	MP2.5, MP1, MP10	319
PATS+	MP2.5	500
AIRQino	MP2.5	1.978
Clarity Node	MP2.5	1.300
MicroPEM[6]	MP2.5	2.000
ES-642	MP2.5	3.000
Met One-831	MP10	2280
AirMatrix	MP1, MP2.5	40
Atmotrack	MP1, MP2.5	2.050
Partector	MP1, MP2.5	7.300
Dylos DC1100	MP2.5-0.5	230
Purple Air Classic	MP1, MP2.5, MP10	220
Purple Air Flex	MP1, MP2.5, MP10	275
Purple Air Zen	MP1, MP2.5, MP10	285
Dylos DC1100 PRO	MP2.5-0.5, MP10-2.5, MP10	290

[4] Precio de referencia del producto el año 2017.
[5] Precio de referencia del producto el año 2016.
[6] Precio de referencia del producto el año 2015.

Dylos DC1700	MP2.5-0.5, MP10, MP10-2.5, MP3, MP2, MP2.5	450
ECOMSMART	NO2, O3, P MP1, MP10, MP2.5	3.850
Air Quality Egg	MP, NO2	1.200
Air Quality Egg	MP, O3	1.200
Air Quality Egg	MP, CO2	1.200
Spec	NO2, CO, O3	315
SENS-IT	NO2, CO, O3	2.500
Aeroqual S-500	O3, NO2	2000
CairClip O3/NO2	O3, NO2	1.000
AQMesh v.3.0	CO, NO	10.000
Vaisala AQT410 v.1.11[7]	CO, NO2	3.700
Vaisala AQT410 v.1.15[8]	CO, NO2	3.700
AQMesh v.4.0	CO, NO, NO2, O3	10.000

Tabla 2: Tecnologías disponibles SSys. (MDPI, 2019)

3.3.2 Control y Aseguramiento de la Calidad (QA/QC) y Calibración

El Control de calidad es el proceso para asegurar que la data proveniente del sensor sea consistente con la data que proveniente de medición estándar conocida. Está acción es realizada, en la mayoría de los casos, mediante técnicas de calibración en donde el sensor entrega resultados utilizando la misma muestra ambiental que un instrumento de referencia o certificación estándar. A través de un proceso de entendimiento y aplicación de la correcta calibración a los dispositivos, el control de calidad **asegura** que data que produce el sensor es robusta y certera.

La calibración de los sensores implica determinar un modelo que pueda ser usado para convertir los parámetros de medición (ej. Absorción de luz, voltaje) en una variable de salida deseada (ej. Concentración de contaminante). Para el caso de algunos sensores, los parámetros de calibración de fábrica se encuentran en fichas técnicas y gran parte de los usuarios las utilizan como su principal método de calibración. Sin embargo, para muchos sensores la calibración de fabrica no es lo suficientemente robusta como para asegurar su certeza a largo plazo. Como resultado, un control de calidad debe ser realizado en condiciones ambientales similares a las que el sensor sería sometido para así aumentar la confianza en la certeza y precisión de la data entregada por el sensor.

Actualmente, existen dos métodos principales para la calibración de sensores: calibración de laboratorio comparando materiales de referencia, y la ubicación conjunta de los sensores y monitores de referencia (previamente calibrados contra materiales de referencia) en el ambiente. Ambos métodos presentan beneficios y dificultades, en orden de aumentar la calidad de los datos y la confianza en las mediciones, es importante seguir la siguiente jerarquía de validación:

[7] Precio de referencia del producto el año 2018.
[8] Precio de referencia del producto el año 2018.

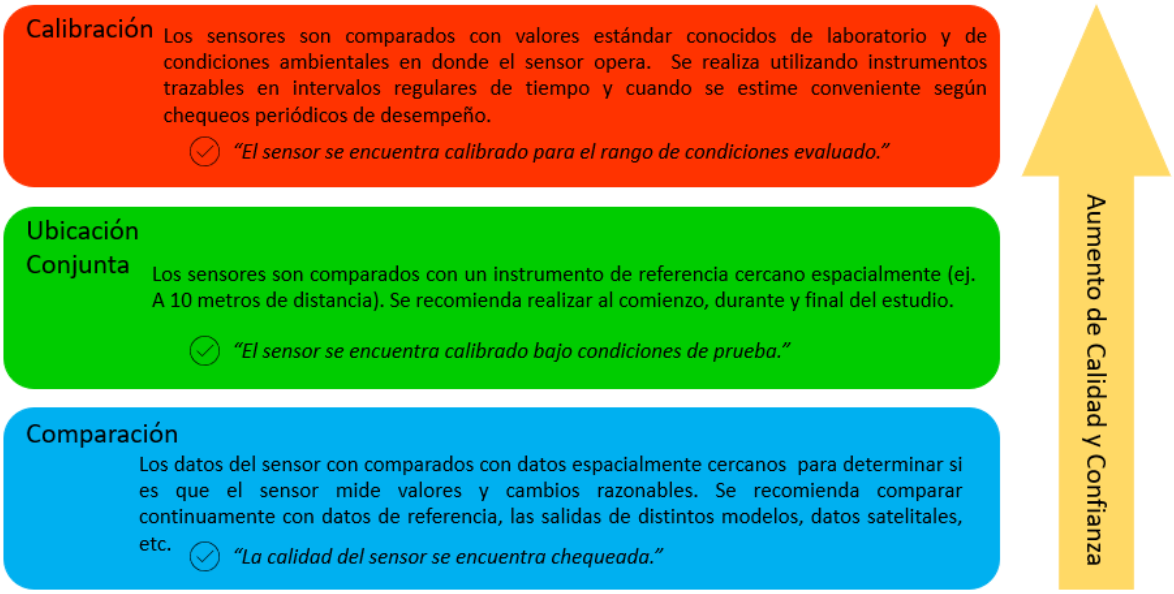


Figura 5: Esquema de los niveles de validación en sensores. (World Meteorological Organization, 2020)

La calibración de laboratorio usualmente involucra someter al sensor a una serie de concentraciones de contaminante, en un ambiente controlado, utilizando estándares de medición conocidos. Desafortunadamente, las condiciones en las que los sensores son calibrados dentro del laboratorio no siempre coinciden con el rango completo de condiciones que se encuentran en el entorno ambiental. Los ensayos en laboratorio, además, están limitados exclusivamente para los usuarios que cuenten con los recursos y/o las oportunidades para acceder al equipamiento necesario. No obstante, estos ensayos pueden ser de gran utilidad para determinar cómo se comportan esos sensores bajo ciertas condiciones controladas, lo que puede contribuir para el entendimiento fundamental de cómo funcionan los sensores.

Con el fin de subsanar algunas de las limitaciones presentes en los ensayos de laboratorio, se ha propuesto que la ubicación conjunta frente a monitores de referencia es un método efectivo de validación, mediante el cual, parámetros de calibración pueden ser aplicados a sensores.

En este método de calibración, el sensor (o sensores) es ubicado en el ambiente, cerca del instrumento de referencia, por un período de tiempo con el fin de proporcionar una comparación directa de los datos de salida del sensor respecto a los del instrumento de referencia previamente calibrado. Puede resultar difícil evidenciar la totalidad de parámetros ambientales en un corto lapso, lo que genera que la calibración deba tomar bastante tiempo (semanas a meses (Kiang, 2021)). Por otro lado, realizar mediciones con este tipo de método por largos períodos de tiempo, como meses o años, pueden ser desfavorables debido a la corta vida útil de los sensores (1 a 5 años). La accesibilidad a las locaciones y equipos de referencia también pueden ser un problema. Los cambios de estación del sitio también deben ser considerados para determinar la frecuencia de calibración.

3.3.3 Instalación: Aspectos a Considerar

En esta sección se discutirán las algunas de las consideraciones y recomendaciones para determinar en qué lugar ubicar los sensores. Para esto, se utilizará la información entregada por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) como referencia (EPA, 2022):

- **Ubicación:** Antes de instalar un sensor, es de utilidad considerar el objetivo que se busca puesto que estos pueden repercutir en la ubicación prevista. Por ejemplo, la ubicación de un sensor que se utilizará para monitorear emisiones de buses detenidos puede diferir respecto a un sensor utilizado para estimar índices de la calidad del aire ambiente.
- **Accesibilidad:** Debido a que los sensores deben pasar por mantenciones luego de su instalación inicial, es vital que estos sean instalados en una ubicación a la que se pueda acceder posterior a su instalación. Si es que la locación es de acceso restringido, se sugiere identificar los permisos, requerimientos de acceso y cualquier tipo de limitaciones que surjan durante la etapa de planificación de la instalación.
- **Energía y comunicación:** Las distintas variedades de sensores pueden requerir de una fuente de energía, energía solar y WiFi, entre otros factores, por lo que es crucial escoger un sitio de instalación que garantice todo lo necesario para los sensores.
  Además, se debería considerar requisitos para la seguridad eléctrica y la impermeabilización del equipo. Otras consideraciones incluyen asegurar que existe una red suficiente (para el caso, el estudio realizado en el producto 3) para contener la data proveniente del sensor.
- **Seguridad:** Es importante ubicar el sensor en un área segura y protegida de manipulación o hurto, esto se puede lograr ubicando el sensor en una zona discreta, como en un área de poco tráfico o lejos del alcance de la mano, pero que garantice la visibilidad de lo que se busca monitorear.
- **Altura:** Debido a que los sensores usualmente se utilizan para medir la exposición de las personas a la calidad de aire, es importante ubicar los sensores dentro de un rango de altura de la zona de respiración, aproximadamente 1 a 1,8 metros de altura. Cabe mencionar que estos deberían ser instalados en una zona lejana a fuentes contaminantes o sumideros, esto con el fin de obtener una medición más representativa. Otros aspectos para considerar son: una instalación que permita flujo libre de aire y evitar zonas cercanas a líneas de alto voltaje (puede generar interferencias).

3.3.4 Uso de Sensores en el Mundo

a) Mumbai, India

En asociación con la Junta de Control de la Contaminación de Maharashtra y el Instituto Indio de Tecnología de Kanpur, Bloomberg Philanthropies apoyó un proyecto piloto de sensores de bajo costo en Mumbai. El proyecto incluyó una evaluación pionera en la India de sensores de monitoreo del aire de bajo costo, desde noviembre de 2020 hasta mayo de 2021.

Este proyecto introdujo la posibilidad de ampliar el monitoreo de la calidad del aire mediante tecnologías basadas en sensores de bajo costo en toda la India, específicamente en las ciudades

del Programa Nacional de Aire Limpio (NCAP). El objetivo principal del proyecto era trabajar con la junta estatal de control de la contaminación para realizar una prueba piloto de la incorporación de sensores de bajo costo en el sistema de gestión de calidad del aire en el estado de Maharashtra y mostrarlo como un modelo para la adopción nacional que podría beneficiar a las regiones con muy poca o ninguna capacidad de monitoreo existente.

Objetivos

- Evaluar el funcionamiento de varios modelos de sensores indios de bajo costo en el entorno indio.
- Generar comodidad y familiaridad entre los tomadores de decisión de la calidad de aire con el uso de sensores de bajo costo.
- Incorporar sensores de bajo costo en el sistema de gestión de la calidad del aire en Maharashtra y mostrarlo como un modelo para la adopción nacional.
- Desarrollar un método eficaz basado en el aprendizaje automático para la calibración de sensores de MP2.5 de bajo costo.

Se instalaron 40 sensores desarrollados por 4 nuevas empresas indias con las 15 CAAQMS (estaciones de monitoreo continuo de la calidad de aire ambiente) de calidad reglamentaria de la Junta de Control de Contaminación de Maharashtra en la región metropolitana de Mumbai. Se colocaron conjuntos de 4 sensores junto a los monitores reglamentarios o gubernamentales, que cubren toda la ciudad de Mumbai. Los monitores reglamentarios específicos seleccionados para la ubicación conjunta se eligieron de modo que se pudiera obtener una muestra representativa de 5 entornos: de fondo, industrial, residencial, comercial y afectado por el tránsito.

Hallazgos del proyecto

- Se determinó que el tiempo de actividad, o el tiempo durante el cual los sensores estuvieron operativos mensualmente, en el caso de los sensores de bajo costo, **fue comparable o superior (>90%) al de los monitores de CAAQMS y que requirieron asistencia manual durante su operación a lo largo del período de implementación de siete meses.**
- Se usaron técnicas de regresión basadas en aprendizaje automático para procesar las lecturas en bruto de sensores de bajo costo y calibrar los resultados para reducir la falta de coincidencia entre los valores calibrados y las mediciones de las CAAQMS. Veinte de los sensores de bajo costo desarrollados por nuevas empresas de la India han producido lecturas que difieren de las de los monitores de calidad reglamentaria (CAAQMS) en un 10-15 %.
- Los hallazgos revelan que después de la calibración, el error (calculado como la relación de la diferencia entre las lecturas del sensor de bajo costo y las lecturas de la CAAQMS) **es inferior al 15 % en el caso de dos sensores e inferior al 20 % en el caso de otros dos sensores**. Los métodos de calibración existentes para sensores de bajo costo funcionan bien en el mismo sitio y dispositivo a los que se aplicaron originalmente.
- Los sensores implementados conjuntamente a los monitores reglamentarios en Mumbai que midieron el MP2.5 coincidieron estrechamente con las lecturas de los monitores en diversos entornos con cargas de contaminación altas y bajas.
- La performance de los sensores de bajo costo fue relativamente mejor entre noviembre y marzo, en comparación con abril y junio. En el último período, el nivel de humedad atmosférica fue mucho mayor, lo que implica que, en ciertos casos, los sensores pueden requerir más de una calibración durante una implementación de un año.

b) París, Francia

En 2019, Bloomberg Philanthropies y el municipio de París lanzaron un proyecto conjunto para comprender mejor y mejorar la calidad del aire en las escuelas de toda la ciudad. El proyecto piloto fue dirigido por Airparif, el observatorio independiente de la calidad del aire de la región de Île-de-France acreditado por el ministerio francés a cargo del medioambiente. Airparif implementó y probó una red de sensores Clarity de bajo costo para generar nuevos conocimientos y datos hiperlocales sobre la calidad del aire y la exposición de los niños a la contaminación del aire.

El estudio piloto se llevó a cabo en el transcurso de un año, entre septiembre de 2019 y septiembre de 2020. Se instalaron un total de 138 sensores Clarity de bajo costo, que midieron los niveles de MP2.5 y NO_2 en 44 escuelas, guarderías y calles cercanas de París. Se instalaron microsensores en los patios y áreas recreativas de las escuelas y en las calles cercanas para evaluar la exposición de los niños a la contaminación en estas zonas.

El proyecto combinó diferentes tecnologías de monitoreo, que incluyeron microsensores Clarity, tubos de difusión y 16 estaciones de referencia. El uso de múltiples herramientas ayudó a detectar dispositivos defectuosos antes de su implementación, a calibrar los dispositivos y a orientar el procesamiento posterior de los datos en bruto.

Durante el proyecto de un año de duración, los socios llevaron a cabo conjuntamente el proyecto piloto en las siguientes etapas:

- Dos etapas iniciales de prueba: Mediante la ubicación conjunta en las estaciones de referencia de Airparif, se identificaron y eliminaron los dispositivos defectuosos (aproximadamente el 10% por lote, lo que corrobora los hallazgos de Airparif y sus socios en experimentos anteriores con microsensores).
- Muestreo de microsensores: Se implementaron un total de 138 sensores de bajo costo suministrados por Clarity. El plan de muestreo fue diseñado para abarcar las escuelas más expuestas a la contaminación del aire, así como zonas ubicadas tanto cerca como lejos de las fuentes de contaminación. El resto de los sensores se instalaron en las calles aledañas a las escuelas para evaluar la variabilidad de las concentraciones de contaminación medidas en calles y patios escolares. También se realizaron mediciones en otros puntos de interés, como intersecciones importantes con concentraciones potencialmente elevadas de contaminantes, y junto a las estaciones de referencia de Airparif, para verificar las mediciones a lo largo del experimento.
- Mediciones de tubos de difusión: Junto a la implementación de microsensores, se realizaron campañas de medición de NO_2 mediante tubos de difusión. Estas mediciones se realizaron a lo largo de 11 semanas durante cuatro períodos de tiempo (octubre-noviembre de 2019, marzo de 2020, junio-julio de 2020 y septiembre de 2020) en 40 escuelas y 16 calles aledañas, siguiendo el mismo plan de muestreo utilizado para los microsensores. El objetivo fue evaluar el rendimiento in situ de los microsensores, proporcionar información de referencia desde el patio de la escuela hasta la calle y medir la diferencia de exposición entre los dos entornos.
- Período de evaluación: El proyecto recopiló datos a lo largo de siete meses sobre el rendimiento y las capacidades de los microsensores para medir concentraciones de fondo de partículas finas. Estos datos se compararon con los mapas de Airparif desarrollados con datos y observaciones modelados (Hor'air) y se compartieron en línea en Paris.fr. El objetivo era evaluar la capacidad de los microsensores para complementar o fortalecer este servicio de intercambio de datos.

Hallazgos del Proyecto

Los hallazgos del proyecto, que incluían datos de sensores de bajo costo junto con tubos de difusión y sistemas de monitoreo existentes, **confirmaron que los niveles de contaminación del aire eran significativamente más bajos en los patios de las escuelas que en las calles cercanas.**

El estudio publicado por Airparif reveló que las concentraciones de contaminantes del aire estaban inversamente correlacionadas con la distancia entre los edificios escolares y las calles cercanas; y que las paredes de las escuelas generaban un "efecto refugio". El estudio mostró una diferencia promedio del 36 % entre las concentraciones de NO_2 observadas en los patios de las escuelas y las calles cercanas, y reveló que la calidad del aire de las escuelas cumplía con las directrices sobre la calidad del aire establecidas por la OMS. Sin embargo, el efecto protector de las paredes y la distancia de las carreteras principales que se observó para el NO_2 no se trasladó a las concentraciones de MP2.5.

Los resultados obtenidos con los sensores de MP2.5 colocados en las escuelas mostraron que las concentraciones en los patios de las escuelas eran similares a las medidas por las estaciones de fondo de la red de referencia de Airparif. Esto indica que la contaminación de fondo de la ciudad es la principal causa de exposición a la contaminación del aire en las escuelas.

En el caso de los niveles de contaminación con NO_2, los datos de los sensores mostraron algunas incongruencias por las que Airparif decidió no utilizar los datos para el estudio. Airparif utilizó los datos de NO_2 recopilados por los tubos de difusión instalados en los distintos lugares para completar su análisis.

Resultados y Lecciones Aprendidas

En sus conclusiones, Airparif recomendó utilizar una red de microsensores junto con los datos de su estación de referencia para calibrar los sensores de manera adecuada, monitorear la contaminación e informar al público (se entregó un informe que incluía una hoja informativa para las escuelas participantes, con datos sobre la calidad de aire recopilados en cada lugar).

Los sensores de bajo costo funcionan de manera diferente según la ubicación de su instalación y su uso. Este experimento a gran escala ha brindado información importante[9] para otras ciudades que están considerando implementar campañas de monitoreo de bajo costo para establecer políticas y reducir la contaminación.

3.4 Dispositivos para Conteo de Vehículos

La contaminación en zonas urbanas es un problema creciente en todo el mundo, y uno de los principales contribuyentes a este problema es el tráfico vehicular. Con el objetivo de entender mejor

[9] https://www.airparif.asso.fr/actualite/2021/mesure-de-la-qualite-de-lair-aux-abords-des-creches-ecoles-et-colleges
https://www.airparif.asso.fr/2021/experimentation-pour-une-meilleure-connaissance-de-la-qualite-de-lair-dans-les-ecoles

la magnitud del problema y encontrar maneras efectivas de abordarlo, se han desarrollado métodos de conteo vehicular en zonas urbanas específicas utilizando inteligencia artificial.

Esta técnica utiliza detección de objetos de aprendizaje profundo conocida como YOLO (You Only Look Once) implementada en Python. La ventaja de esta técnica es su capacidad para detectar objetos en imágenes o videos en tiempo real, lo que es esencial para una aplicación de conteo vehicular en un ambiente cambiante como el tráfico urbano.

Se recolectan imágenes de la zona de estudio utilizando cámaras convencionales y se utilizan para entrenar un modelo YOLO específico para detectar automóviles. Una vez entrenado, el modelo puede ser utilizado para analizar imágenes y videos adicionales tomados en el mismo lugar y contar el número de vehículos detectados.

Además de contar el número de vehículos, se utilizan técnicas de procesamiento de imágenes para analizar características adicionales de los vehículos detectados, como la velocidad y la dirección del movimiento. Esta información se utilizar para generar estadísticas y gráficos que ilustran la dinámica del tráfico en la zona de estudio.

El proyecto tiene como objetivo proporcionar información valiosa para las autoridades encargadas de tomar decisiones en cuanto a la gestión del tráfico y la reducción de la contaminación en zonas urbanas. Con la información generada en este proyecto, se espera poder proponer medidas eficaces para reducir la contaminación y mejorar la calidad de vida de los residentes de la zona urbana estudiada.

3.4.1 Descripción de YOLO

YOLO (You Only Look Once) es un algoritmo de detección de objetos en imágenes y videos en tiempo real. Lo que lo hace único es que puede detectar y localizar múltiples objetos en una sola imagen o fotograma de video simultáneamente. YOLO divide la imagen en una cuadrícula y predice las cajas delimitadoras y las clases de objetos para cada celda de la cuadrícula.

Se hace un levantamiento de necesidades para diseñar el desarrollo del producto, tener claridad de los tiempos de desarrollo y hasta qué punto se puede entregar y que se deja como propuesta de desarrollo a futuro. Se decide tomar como arquitectura AlexNet, popularmente conocida como YOLO que es entrenada con el dataset COCO (Common objects in context), uno de los pilares en las tareas de visión por computador que tiene más de 330.000 imágenes, con una cantidad superior a 200.000 de etiquetas, 80 categorías, y con implementación de reconocimiento y segmentación de objetos.

Se toma la decisión de desarrollar la solución bajo PyTorch, a diferencia de lo que normalmente se tiene en producción con Tensorflow. Hacer este cambio de librerías está orientado a poder desarrollar varias versiones del producto, la primera fija, que es creada con pesos de la red normales, que se pueda ejecutar en una estación o en la nube, y tomar versiones de pesos pequeñas para llevarlos a sistemas embebidos como Jetson Nano, Beaglebone, que permita crear estaciones de monitoreo en tiempo real, y esa flexibilidad lo permite PyTorch con sus versiones de Yolo. Una vez que se creen la versión de escritorio y mobile del desarrollo, se plantea el desarrollo en arquitectura CLOUD que permita procesar video en vivo mediante streaming o videos grabados en cualquier formato multimedia disponible. La importancia del desarrollo consiste no solo en hacer detecciones correctas, o con un índice superior para evitar las falsas detecciones, también es importante realizar tracking o

seguimiento a las detecciones, lo que disminuye las cantidades de error que se pueden encontrar en este tipo de desafíos y las mediciones pueden ser más confiables. Se crea un algoritmo con muchas posibilidades como mostrar el video procesado, guardar resultados, umbral de detección, posición de ROI, tipos de ROI, etc.

En comparación con otras redes de clasificación de propuestas de región (RCNN rápido) que realizan la detección en varias propuestas de región y, por lo tanto, terminan realizando predicciones varias veces para varias regiones en una imagen, la arquitectura de Yolo se parece más a FCNN (red neuronal totalmente convolucional) y pasa la imagen (una vez a través de FCNN y la salida es predicción. Esta arquitectura está dividiendo la imagen de entrada en cuadrícula y para cada generación de cuadrícula 2 cuadros delimitadores y probabilidades de clase para esos cuadros delimitadores.

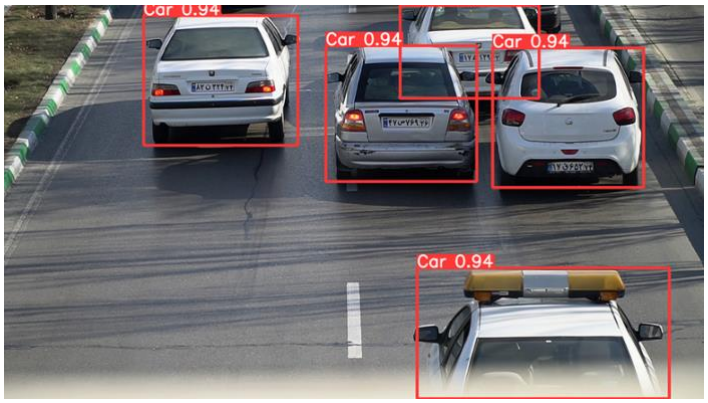


Figura 6: Representación del Funcionamiento del Algoritmo YOLO.

3.4.2 Dispositivo GPU de Bajo Costo

Se plantea la utilización de un dispositivo electrónico sofisticado, pero de bajo costo, para instalar YOLO y realizar conteos vehiculares. Las características del producto identificado son las siguientes:

- Kit de bajo costo (USD 150)
- Tarjeta GPU NVIDIA Jetson Nano
- Cámara Rasperry Pi
- Compatible con Yolo
- PyTorch es compatible con la GPU gracias al API CUDA (Compute Unified Device Architecture), desarrollado por NVIDIA

Figura 7: Prototipo del Dispositivo GPU.

4 Emisiones Vehiculares y su Impacto

4.1 Emisiones Vehiculares en Chile y la Región Metropolitana de Santiago

Los actuales problemas de contaminación y cambio climático están directamente relacionados con emisiones de contaminantes criterio -que afectan la calidad del aire, con importantes efectos en la salud- y de forzantes de cambio climático. Estimar estas emisiones es un prerrequisito para cuantificar el impacto de las actividades humanas tanto en la salud como en el clima, y así desarrollar estrategias efectivas de mitigación y políticas que permitan abordar ambos problemas de manera integrada.

Para poder cuantificar adecuadamente su impacto, no solo es importante conocer la cantidad total de emisiones, sino que también saber dónde y cuándo se producen. Para tal objetivo, se realizó un inventario de emisiones nacional para el periodo 2015-2017, con los principales sectores responsables de contaminantes criterio y agentes de cambio climático. Este inventario incluye la ubicación de las fuentes a través de mapas de alta resolución espacial (aproximadamente 1 kilómetro a nivel nacional), permitiendo así estimar su impacto sobre la población.

Al hacer esta diferenciación espacial, queda en evidencia que el impacto de cada sector varía según la zona geográfica y el contaminante. Si bien en las ciudades del centro y sur de Chile el $MP_{2.5}$ proviene principalmente del uso residencial de leña, en la zona norte proviene de los sectores transporte e industria, mientras en Santiago es una combinación de todos los sectores anteriores. En tanto, en el total de emisiones de CO_2 a nivel país, los sectores dominantes son energía y transporte.

El sector transporte se concentra como fuente de emisión de contaminantes en zonas urbanas, especialmente en las principales ciudades del país. Los vehículos con motores de combustión generan, principalmente, $MP_{2.5}$, monóxido de carbono (CO), NOx y compuestos orgánicos volátiles (COV). El año 2017, a nivel nacional, el transporte vial representó un 1 % del $MP_{2.5}$ directo anual, aunque en las comunas de Alto Hospicio, Vallenar y Pudahuel llegó a más de 80 % y, en la provincia de Santiago, representó más de un 50 % de las emisiones anuales en siete de sus 45 comunas. En términos de NOx, el sector transporte representa el 42 % de las emisiones totales en el país, aunque en 92 comunas representa más del 90 %.

Existe una relación estrecha entre la contaminación atmosférica y mortalidad y morbilidad, en términos de número de hospitalizaciones cardiorrespiratorias, pobreza multidimensional y sensibilidad a la contaminación atmosférica. Las admisiones hospitalarias cardiorrespiratorias atribuibles a la contaminación son mayores en las comunas del sur-poniente.

La figura siguiente muestra la distribución de emisiones de NOx generadas por fuentes móviles en la Región Metropolitana de Santiago, año 2020, junto a la red de ciclovías:

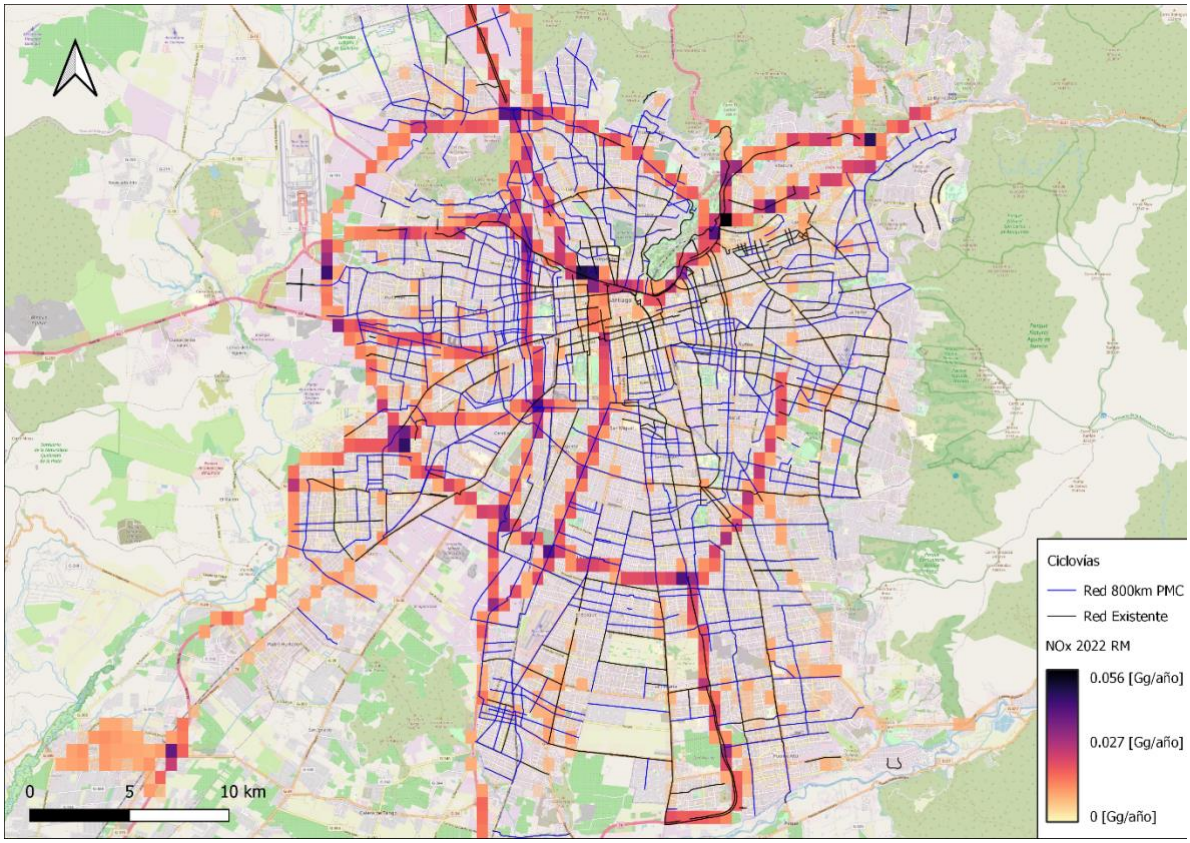


Figura 8: Distribución de emisiones NOx generadas por fuentes móviles para el año 2020.

Esta información es utilizada como criterio para la selección de puntos de la red de monitoreo, descrita en el capítulo siguiente.

4.2 Exposición a Contaminantes para Usuarios de Distintos Modos de Transporte

Desde que comenzaron a conocerse los efectos de los gases invernadero y el calentamiento global, ha entrado en la mente del ser humano las consecuencias qué significa emitir grandes cantidades de desechos a la atmósfera. Para el caso del transporte, en la década de los 90 surgieron una serie de restricciones que limitaban la cantidad de gases de escape que podían emitir los vehículos, como una medida para reducir el calentamiento global. Al mismo tiempo, comenzaron a realizarse estudios para entender el efecto que tienen estas emisiones sobre los usuarios al utilizar estos medios de transporte.

Con el fin de cuantificar la cantidad de contaminantes a los que están expuestos ciclistas en la ciudad de Santiago se considerarán como referencia dos trabajos de tesis, la primera realizada por M. Salvatierra, y la segunda por G. Gutiérrez, en donde se abarca esta temática.

4.2.1 Revisión de Estudios Internacionales

Algunos de estos estudios realizados fueron descritos en el trabajo de tesis de M. Salvatierra (Salvatierra, 2016), en donde se pudo desprender las siguientes conclusiones:

- La exposición a distintos contaminantes depende de una variedad de factores, de los cuales se puede descartar el viento si se toma una muestra suficientemente grande. Estos factores son: ruta elegida, modo de transporte, hora, y en menor grado, época del año.
- Tanto ciclistas como los peatones están menos expuestos a contaminantes en comparación a pasajeros de bus y de automóviles, pese a no tener la protección de la estructura de estos últimos.
- No existe correlación entre el nivel personal de exposición a contaminantes y la exposición medida por estaciones de puntos fijos, por lo que estos últimos no sirven como un modelo para estimar los índices de exposición de una persona.

Nuevamente en base a la tesis realizada por M. Salvatierra (Salvatierra, 2016), se hace hincapié en tres estudios, el primero realizándose en el año 2007, que indicó que la tasa de respiración de un ciclista es mayor que la de un peatón y ésta aumenta mientras se vaya a mayor velocidad. Pese a esto, su estudio muestra que, aunque a mayores velocidades la tasa de respiración es mayor, el tiempo al que está expuesto a contaminantes es menor, por lo que la absorción de elementos contaminantes por los pulmones es menor, absorbiendo un 17% menos de benceno.

El segundo estudio (realizado el año 2012), sin embargo, indica lo contrario: que, a un mayor esfuerzo, es decir, con mayor tasa de respiración, el ciclista puede absorber hasta un 64% más de MP2.5 respecto a un ciclista en descanso. Cabe destacar que este último estudio se realizó en Bogotá, con condiciones atmosféricas más adversas, ya que está a una mayor altura respecto a nivel el mar y la ciudad en sí tiene mayores índices de contaminación, con un promedio de 60 [$\mu g/m^3$] de MP10.

Por último, el año 2013, dentro de un estudio realizado en Dublin, los resultados muestran que el pasajero de bus fue el más expuesto a material particulado MP2.5 y el conductor de automóvil el más expuesto a emisiones vehiculares (benceno, etano, etileno, etc.).

4.2.2 Exposición de Ciclistas a Material Particulado y Carbono Negro en Santiago

Este trabajo tuvo como objetivo analizar la exposición de ciclistas a material particulado y carbono negro en Santiago. En particular, esto se realizó mediante una campaña de medición de una duración de 8 semanas, en donde el usuario recorrió en bicicleta 3 tipos de ciclovías: independientes (ubicadas en parques o plazas, donde no se permite la circulación de automóviles), segregadas (la vía es compartida entre vehículos motorizados y bicicletas, donde la ciclovía es delimitada por un elemento físico) y compartidas (la vía es compartida entre vehículos motorizados y bicicletas pero la ésta se comporta como un carril de tránsito normal). La distancia recorrida para cada tramo fue la siguiente:

Nombre	Tipo	Longitud $[km]$
Alameda	Independiente	9,7
Las Perdices	Independiente	8,46
Grecia	Independiente	8,24
Costanera	Independiente	7,21
Sánchez Fontecilla	Independiente	6,28
Pocuro	Independiente	2,74
Antonio Varas	Segregada	3,86
Ricardo Lyon	Segregada	3,72
General Bulnes	Segregada	2,18
Latadia	Segregada	1,93
Isabel La Católica	Segregada	0,955
Americo Vespucio	Compartida	9,91
Macul	Compartida	6,09
Príncipe de Gales	Compartida	3,49
Agustinas	Compartida	3,28

Figura 9: Ciclovías recorridas clasificadas por tipo y su longitud total. (Salvatierra, 2016)

Sumado a esto, se diferenció los tipos de ciclovías según color: verde para ciclovías independientes, azul para las segregadas, y rojo para calles compartidas sin ciclovía:

Figura 10: Ciclovías seleccionadas para el estudio. (Salvatierra, 2016)

La fecha de inicio de la campaña fue el 3 de mayo y el término el 7 de junio. Se midió un mínimo de 4 horas al día, cubriendo horas peak AM (07:00-09:00 hrs) y PM (17:00-19:00 hrs), realizando un total de 43 horas donde se toman muestras de aire. Dentro de este mismo rango de fechas, se incluyeron dos semanas para tomar muestras durante el horario valle.

Los instrumentos utilizados en este estudio fueron:

- MicroAeth AE51: Etalómetro para realizar mediciones de carbono negro.
- Unidad VAM: Instrumento que contiene GPS para tomar mediciones de ubicación.
- GoPro: Para registrar las observaciones realizadas durante las mediciones.

Resultados

La concentración de carbono negro a la cual se expone el ciclista varía enormemente. Se pudieron notar diferencias entre las ciclovías y los horarios a los que puede optar el ciclista, pero incluso dentro de un mismo recorrido, bajo similares condiciones, existe una gran variación en la exposición. El factor que más influye en la exposición del ciclista es el **tipo de ciclovía donde circula.** En las ciclovías independientes se tiene un promedio de 35% menos exposición respecto a las ciclovías segregadas, las cuales presentan la mayor exposición promedio de 15.102[ng/m^3], mientras que las calles compartidas tienen un 7% menos exposición promedio respecto a las ciclovías segregadas.

El horario de circulación es un factor que también influye en la exposición del ciclista, ya que si se prefiere el horario valle se puede tener 19,6% menos exposición promedio comparado con los horarios punta. Finalmente, la calidad de aire es un factor que no influye en la exposición de carbono negro al ciclista, ya que el entorno en el que circula el ciclista es muy dinámico, donde se recibe los gases de escape de diversos vehículos, eclipsando la contaminación presente en la atmósfera.

- **Tipos de ciclovía**
  La distancia de la fuente influye enormemente en la exposición del ciclista. Tanto en calles compartidas sin ciclovía como en ciclovías segregadas se está a una distancia menor a 2 metros de los vehículos, por lo que facilita que los contaminantes lleguen al ciclista antes de dispersarse en la atmósfera. En cambio, para las ciclovías independientes, en especial aquellas donde se tiene una mayor distancia respecto a la calle, los niveles de exposición son menores.

  Las ciclovías con mayor exposición promedio a carbono negro fueron Antonio Varas, con 17.615 [ng/m^3], seguido por Ricardo Lyon, con 17.601 [ng/m^3], ambas ciclovías segregadas. La ciclovía con menor exposición es Las Perdices, con 5.060 [ng/m^3], seguido por Costanera, con 6.125 [ng/m^3], ambas ciclovías independientes.

- **Horario de Circulación**
  Existe poca variación de exposición de carbono negro para los horarios punta de la mañana y la tarde, donde tienen una exposición promedio de 12.665 [ng/m^3] y 12.863 [ng/m^3], respectivamente, mientras que para el horario valle se ve una significativa disminución al contaminante, con un promedio de 10.332 [ng/m^3]. En particular, el nivel máximo de exposición se presentó en las ciclovías segregadas durante el horario punta de la tarde.
- **Calidad de aire**
  Del estudio se pudo concluir que los niveles de exposición a carbono negro no tienen relación con la concentración de MP2.5 atmosférica. Las estaciones de monitoreo de calidad de aire son puntos fijos y no se ven afectadas por las condiciones a las que se expone el ciclista.
- **Hotspots**
  Existieron puntos en donde el nivel de exposición del ciclista llegó a ser 50 veces más alto que el promedio global durante breves períodos de tiempo y ocurren regularmente durante un recorrido. La mayoría de estos ocurrieron en intersecciones con avenidas principales, donde destaca el flujo de buses de Red.

4.2.3 Impacto del Diseño de Ciclovías en la Exposición de Usuarios

Este trabajo tuvo como objetivo analizar el impacto del diseño de ciclovías con la exposición de usuarios a compuestos contaminantes en Santiago. Para esto, se seleccionaron tres ciclovías en donde se midió la concentración de MP, CO_2 y carbono negro en diferentes momentos del día (mañana y tarde). Además, estas mediciones se compararon con mediciones realizadas en otros modos de transporte.

Las ciclovías seleccionadas fueron Avenida Lyon-Suecia, Avenida Matta y Avenida Tobalaba. La elección de estas ciclovías se basa en su ubicación cercana (0 y 3 metros de distancia de vehículos), intermedia (3 y 8 metros de distancia) y lejana (más de 8 metros de distancia), respectivamente, lo que permitió realizar un análisis comparativo de la concentración de contaminantes en función del tipo de diseño de ciclovía.

Los equipos utilizados en el estudio fueron:

- MicroAeth MA300: Para la medición de carbono negro.
- Aranet4: Para la medición de dióxido de carbono, temperatura y humedad relativa.
- Hiri: Sensor de bajo costo diseñado por la universidad del desarrollo para medir material particulado.
- Grimm: Para la medición de concentración y tamaño de partículas en el aire.
- VAM: Unidad VAM: Instrumento que contiene GPS para tomar mediciones de ubicación.
- GoPro: Para registrar las observaciones realizadas durante las mediciones.

La distancia recorrida para cada tramo fue la siguiente:

Ciclovía	Tipo de ciclovía	Longitud	Transporte Publico
Av. Lyon-Suecia	Cercana	4,08 [km]	No
Av. Matta	Intermedia	1,87 [km]	Si
Av. Tobalaba	Lejana	7,05 [km]	Si

Figura 11: Resumen de Ciclovías Seleccionadas. (Gutiérrez G. , 2023)

La fecha de inicio de las mediciones fue el 21 de noviembre del 2022 hasta el 19 de diciembre de 2022. Se registraron datos para el horario AM (08:00-10:00 hrs) y PM (18:00-20:00 hrs). Se realizaron 4 mediciones AM y 4 mediciones PM para cada ciclovía. Además, se llevaron a cabo mediciones dentro del transporte público en dos de las ciclovías seleccionadas, ya que estas cuentan con vehículos motorizados. Estas mediciones se realizaron 8 veces por cada ciclovía en horario AM. Se tomaron 4 mediciones diarias debido a que el transporte público se desplaza a mayor velocidad que la bicicleta.

Además, se llevaron a cabo mediciones extra en otras ciclovías con el fin de comprobar si los resultados obtenidos anteriormente sobre la exposición se replican en un conjunto más amplio de ciclovías. Estas fueron:

- Av. Las Perdices (ciclovía lejana)
- Fernando Castillo Velasco (ciclovía intermedia)
- Av. Grecia (ciclovía intermedia)

- Ciclovía de Juan Moya Morales (ciclovía cercana)

Resultados

- **Horario de medición**
  En relación con la concentración de Carbono Negro, se observó que existe una tendencia a aumentar las concentraciones en el horario PM. Respecto a la variabilidad de los datos, se concluye que Av. Tobalaba presenta una variabilidad moderada con valores atípicos en ambos horarios, lo que sugiere que hay factores adicionales que podrían estar influyendo en la distribución de los datos y que deben ser considerados cuidadosamente en el análisis. Av. Ricardo Lyon-Av. Suecia presentó una distribución homogénea y consistente, mientras que los datos de Av. Matta presentan una gran variabilidad con valores extremos o atípicos, lo que puede indicar la presencia de factores externos que afectan la concentración de carbono negro en la zona.
- **Bicicleta versus transporte público**
  En general, los resultados sugirieron que la exposición a contaminantes es menor al utilizar el transporte público en ambas ciclovías. En particular, se encontró una disminución del 33% y 63% en la concentración de carbono negro al utilizar el transporte público en Av. Tobalaba y Av. Matta respectivamente.
  Además, se observó que Av. Matta presenta una gran variabilidad en la concentración de carbono negro, lo que sugiere la existencia de múltiples factores ambientales y/o humanos que influyen en su distribución. Por otro lado, al realizar la medición en el transporte público, se observó que los datos están representados por una caja corta, lo que indica que la mayoría de los datos se concentran en un rango estrecho, pero con una tendencia a tener valores más bajos.
- **Diseño de la Ciclovía**
  Los resultados de este análisis muestran que la distancia de la ciclovía a la vía motorizada no es el único factor determinante en la exposición de los ciclistas a los contaminantes atmosféricos. Otros factores, como la densidad del tráfico y condiciones ambientales, como la velocidad y dirección del viento, también pueden influir en la exposición de los ciclistas.
  En particular, los hallazgos sugieren que la exposición al carbono negro puede ser más baja en ciclovías más cercanas a las vías motorizadas en algunos casos, lo que indica que la densidad del tráfico y las condiciones ambientales son factores importantes que deben tenerse en cuenta al evaluar la exposición de los ciclistas a los contaminantes atmosféricos en relación con el diseño de la ciclovía. Además, se observó que la exposición al MP2.5 disminuye a medida que la ciclovía se acerca a la vía motorizada.
  Los niveles de exposición al CO_2 fueron bastante uniformes a lo largo de las 3 ciclovías evaluadas, lo que sugiere que otros factores ambientales, como la densidad del tráfico, la velocidad el viento y la dirección, pueden tener un mayor impacto en la exposición de los ciclistas al CO_2.
- **Exposición en un grupo más grande de ciclovías**
  La expansión a otras ciclovías de Santiago permitió una validación más amplia de los resultados obtenidos en el estudio inicial. Los mapas de exposición generados para las ciclovías seleccionadas han demostrado que la exposición a los contaminantes atmosféricos no depende exclusivamente de la calle, sino que también está influenciada por factores como la densidad del tráfico vehicular, la velocidad y la orientación del viento. Además, se ha observado que la distancia a la vía motorizada no es el factor más determinante en la exposición al CO_2.

4.3 Análisis Redes de Ciclovías y Potenciales Usuarios en Santiago

En Chile se ha visto un fuerte impulso del uso de la bicicleta durante los últimos años, desde usuarios que tomaron la iniciativa de utilizar este medio para transportarse a sus lugares de trabajo, así como también estacionamientos de alquiler de bicicletas o scooters eléctricos. Este aumento se intensificó dentro de los años 2018 al 2021, donde se realizaron cerca de 1.644.070 viajes diarios en bicicleta a lo largo de los 1.886 kilómetros de ciclovías distribuidas en el territorio nacional. (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2021)

Para los expertos, el rol de la bicicleta en los viajes es cada vez de mayor envergadura, lo cual estiman puede llegar a representar un 10% de los viajes totales.

La tendencia con los años ha demostrado un alza, reflejada en la encuesta origen destino (EOD), donde el año 2001 el uso de la bicicleta representaba el 2,1% de los viajes, equivalente a 329 mil viajes diarios. En 2012, el uso de la bicicleta representó el 3,9% de los viajes diarios, equivalente a 676 mil viajes diarios. Si bien, hoy no se cuenta con una encuesta origen destino actualizada, se estima que la cantidad de viajes en bicicleta se pudo haber duplicado. (Rodriguez, s.f.)

Este crecimiento queda confirmado por la Encuesta Nacional de Medio Ambiente 2020 (Ministerio de Medio Ambiente, 2020), en donde se indica que un 8% de la población residente en la Región Metropolitana utiliza la bicicleta como su principal medio de transporte.

Es importante considerar el efecto de la pandemia COVID-19 al estudiar cómo se desplaza la población dentro de la ciudad. Esto quedó reflejado en un estudio hecho a fines del 2021, donde se indicó que un 23% de los usuarios considera cambiar su modo de transporte a bicicleta. (Automóvil Club de Chile, 2020)

Este significativo aumento de ciclistas ha llevado a una expansión de la infraestructura ciclista en todo el país. Actualmente, Chile cuenta con un total de 1.396 ciclovías, que se traduce en 2.072 km de vías exclusivas para bicicletas.

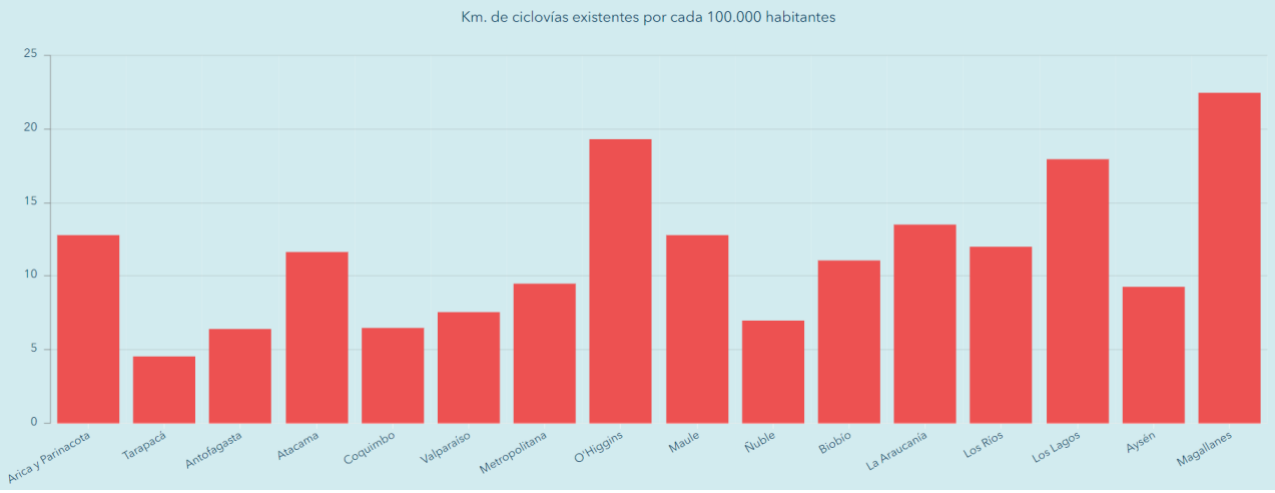


Figura 12: Kilómetros de ciclovías existentes por cada 100.000 habitantes. (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, s.f.)

En la Figura 12 se puede apreciar la cantidad de kilómetros de ciclovías existentes por cada 100.000 habitantes en las distintas regiones de Chile. De acuerdo con lo observado, las regiones de Magallanes y O'Higgins poseen la mayor cantidad de kilómetros de ciclovías, con 22,4 y 19,3 kilómetros respectivamente. En contraste, la Región Metropolitana cuenta con 9,5 kilómetros de ciclovías por cada 100.000 habitantes.

En la actualidad, la ciudad de Santiago cuenta con un total de 486 ciclovías, lo que equivale a una extensión de 781 [km]. Además, actualmente se está llevando a cabo la ejecución de 22 nuevas ciclovías, lo que sumará un total de 47 [km] adicionales a la red existente. Todos los avances en la construcción de ciclovías en Santiago están dirigidos por el Plan Maestro de Ciclovías, la iniciativa del DMTT del GORE RMS.

4.3.1 Análisis Encuesta Origen Destino Gran Santiago

Para establecer un diseño de plan de monitoreo se analizó la encuesta Origen-Destino del Gran Santiago, con un enfoque en viajes inferiores a 8 kilómetros y micromovilidad. Esta encuesta se efectúa con el fin de ser una fuente de información relevante sobre la movilidad de los ciudadanos de determinadas ciudades. En particular, la encuesta que se utilizará fue publicada en el 2012, donde fueron encuestados un total de 17.273 hogares y fueron registrados los viajes que realizan diariamente los integrantes de cada hogar.

Entre la información disponible en las encuestas se encuentran: origen del viaje, destino, tiempo que toma realizar el viaje, transportes utilizados (pueden ser varios si el viaje consta de más de una etapa), propósito, horario y día que realizan aquellos viajes. Todos los datos son recolectados desde una base de datos, llevando registro de cada hogar encuestado y las personas que lo componen.

Al ser una encuesta que se realizó el año 2012, entre los medios de transporte utilizados no se encuentran los scooters, bicicletas eléctricas, entre otros, los cuales han adquirido protagonismo los últimos años en Chile.

La encuesta que se analizará corresponde al Gran Santiago donde se tiene un total de 113.591 encuestas realizadas. El primer filtro será la distancia entre los puntos de origen y destino de este. Esta distancia se calculó a partir de las coordenadas de partida y final del viaje, cuyos datos son entregados en la base de datos disponibles. Los viajes por considerar serán los menores a 8 km, con el fin de enfocarse en los viajes cortos al momento de implementar la micromovilidad, teniendo en total a analizar 62.121 viajes que cumplen con esta caracterización. En los informes presentados de las EOD, los resultados finales presentan un factor el cual extrapola los resultados y así representar a la ciudad completa analizada, lo cual no será considerado al momento del análisis a realizar y solo se trabajarán con los 62.121 viajes mencionados.

Hay que tener en consideración que, al momento de obtener la distancia entre los puntos de origen y destino, esta se obtiene sin tener en consideración el diseño de las calles y comunas, esto quiere decir que la distancia obtenida es una línea recta entre ambos puntos, lo que hace diferir de la distancia recorrida realmente.

Dentro de la base de datos la información está disponible con códigos que representan cada comuna de origen y destino, horario en el cual se realiza el viaje, propósito, tipo de día que se realiza el viaje, entre otros. Estos códigos serán traducidos para dejar la información directamente en la base de

datos, sin necesidad de ir revisando que significa cada uno de los códigos disponibles. Se fue filtrando la información relevante y eliminando la que no fuera necesaria, la información necesaria para realizar este análisis corresponde: Origen, destino, distancia, propósito, etapas de viaje y en que medios de transporte se realizaron, tipo de transporte utilizado (privado, publico, mixto o no motorizado), periodo del día al que corresponde el viaje, ingreso de hogar y la tenencia de auto por hogar.

Para este capítulo se toma como referencia el trabajo de tesis realizado por G. Prado (Prado, 2022), en donde se realiza un análisis de la temática. Dentro de los filtros realizados, se consideró, en primera instancia, la distancia del viaje, en donde se buscó filtrar los viajes con distancias menores a 8 [km] con la finalidad de enfocarse en viajes cortos al momento de implementar la micromovilidad.

4.3.2 Mayor Densidad Poblacional

Puente Alto

Se registró un total de 4.317 viajes totales con origen en la comuna de Puente Alto. De estos, el 80% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de Puente Alto, seguidos por La Florida y a Pintana, que en total representan el 95% de los viajes realizados. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 67% de los viajes los concentra el automóvil, bus alimentador y caminata, con un 26%, 23% y 18% respectivamente.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 45% corresponde a distancias menores a 2 [km].

Maipú

Se registró un total de 4.210 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de Maipú. De estos, el 80% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de Maipú, seguidos por Cerrillos, Pudahuel y Estación Central, que en total representan el 95% de los viajes realizados. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 72% de los viajes los concentra el automóvil, caminata, bus troncal y bus alimentador. Cabe mencionar que la caminata representa casi el 20% de los viajes.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 44% corresponde a distancias menores a 2 [km].

La Florida

Se registró un total de 3.280 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de La Florida. De estos, el 67% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de La Florida, seguido por Puente Alto, que en total representa el 80% de los viajes realizados. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 70% de los viajes los concentra el automóvil, caminata, caminata y bus alimentador. Cabe mencionar que la caminata representa casi el 20% de los viajes.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 36% corresponde a distancias menores a 2 [km].

4.3.3 Mayor ICVU

Vitacura

Se registró un total de 1.258 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de Vitacura. De estos, el 41% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de Vitacura. El 87% de los viajes de destino los concentran las comunas de Vitacura, Las Condes y Providencia, con un 41%, 37% y 9% respectivamente. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 74% de los viajes los concentra el automóvil.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 67% corresponde a distancias menores a 4 [km].

Las Condes

Se registró un total de 4.100 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de Las Condes. De estos, el 55% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de Las Condes. El 80% de los viajes de destino los concentran las comunas de Las Condes, Providencia, y Vitacura. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 60% de los viajes los concentra el automóvil, seguidos por la caminata y metro, con un 10% y 8% respectivamente.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 67% corresponde a distancias menores a 4 [km].

La Reina

Se registró un total de 1.320 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de La Reina. De estos, el 42,5% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de La Reina. El 85% de los viajes de destino los concentran las comunas de La Reina, Las Condes, Providencia, y Ñuñoa. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 57% de los viajes los concentra el automóvil, seguidos por el bus troncal y la caminata, con un 12% y 11% respectivamente.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 67% corresponde a distancias menores a 4 [km].

4.3.4 Menor ICVU

La Pintana

Se registró un total de 1.110 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de La Pintana. De estos, el 40% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de La Pintana. El 64% de los viajes de destino los concentran las comunas de La Pintana, Puente Alto y La Granja, con un 40%, 15% y 9% respectivamente. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 65% de los viajes se realizan entre bus alimentador, caminata y bus troncal.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 44% corresponde a distancias menores a 2 [km], mientras que el 67% con menores a 4 [km].

4.3.5 Mayor Infraestructura Disponible

Para analizar el último criterio se buscó las comunas con mayor cantidad de ciclovías construidas y kilómetros disponibles para la utilización de bicicletas y otros medios de transporte según el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

Santiago Centro

Se registró un total de 5.430 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de Santiago Centro. De estos, el 38% corresponde a viajes menores a 8 kilómetros con destino la misma comuna de Santiago Centro. El 80% de los viajes de destino los concentran las comunas de Providencia, Las Condes, Santiago y Ñuñoa. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 65% de los viajes se realizan entre bus alimentador, caminata y bus troncal.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 44% corresponde a distancias menores a 2 [km], mientras que el 67% con menores a 4 [km].

Providencia

Se registró un total de 3.420 viajes totales aproximadamente con origen en la comuna de Providencia. De estos, el 53% de los viajes se concentran dentro de las comunas de Santiago y Providencia, con un 44% y 9% respectivamente. Por otro lado, respecto a la modalidad de transporte, el 45% de los viajes los concentra el automóvil, seguidos por el metro y la caminata, con un 29% y 28% respectivamente.

De los viajes menores a 8 kilómetros, el 38% corresponde a viajes menores a 2 [km].

4.4 Análisis de Viajes Cortos en Encuesta Origen-Destino Gran Santiago

Sumado a este trabajo, se estudió la investigación realizada por D. Gutiérrez (Gutiérrez D. , 2020), en donde se analizaron nuevamente todos los viajes debajo los 8 kilómetros, segregando por intervalos de 2 kilómetros, es decir, viajes entre 0 y 2 [km], 2 y 4 [km], 4 y 6, y 6 y 8 [km]. Además, se realizó una distinción en cuánto al propósito del viaje.

Luego de analizar las 40 comunas entregadas por la EOD se lograron distinguir 4 categorías de viajes: La primera, **cotidiano privado**, en donde los viajes se efectúan con propósitos cotidianos tales como estudios y/o trabajo en medios de transporte privados, que se caracterizan a su vez por ser motorizados tales como autos y/o motos. La segunda, **cotidiano público**, mantiene los propósitos de la categoría anterior pero realizados con medios de transporte público tales como autobús o metro. La tercera, **no-cotidiano privado**, se caracteriza por viajes con propósito no cotidiano, tales como diversión, ir al médico, hacer trámites, etc. usando medios de transporte privado (a su vez

motorizados). La cuarta categoría, **no-cotidiano público**, combina los propósitos no cotidianos con medios de transporte público.

En cuanto a las categorías identificadas, las categorías cotidiano público y no-cotidiano privado dominan la cantidad de viajes registrados, por sobre las categorías cotidiano privado y no-cotidiano público. En general, en estas 4 categorías se observa que el 50% de los viajes originados en una comuna, su destino converge entre 2 a 3 comunas, que suelen ser colindantes a las comunas de origen, indicando cómo se concentran los viajes en Santiago.

Por otro lado, se observa que, para los viajes realizados en modos privados de transporte, se tiende a haber más viajes dentro de la misma comuna donde se originaron. El usuario a pesar de tener mayor libertad de movimiento con un vehículo personal, los datos muestran que existe una tendencia a moverse cerca del punto de origen del viaje.

Respecto a los viajes con propósitos no-cotidianos, los datos muestran que tiende a haber una mayor cantidad de viajes menores a 8 [km], concluyendo que el usuario prefiere mantenerse cerca de su domicilio o punto de origen de viaje.

Las comunas que asoman como potenciales nichos o zonas donde los usuarios podrían cambiar de modo de transporte, son (por categoría) las siguientes:

- **Cotidiano privado:** Santiago, Providencia, Las Condes, Ñuñoa, Maipú, La Florida, La Reina y Lo Barnechea.
- **Cotidiano público:** Santiago, Providencia, Maipú, Ñuñoa, La Florida, Las Condes, La Pintana, Conchalí y Colina.
- **No-cotidiano privado:** Santiago, Las Condes, La Florida, Ñuñoa, Maipú, La Reina y Lo Barnechea.
- **No-cotidiano público:** Santiago, Providencia, Las Condes, Maipú, La Florida, Ñuñoa, Colina, Conchalí, La Pintana, Cerro Navia y El Bosque.

En base a la cantidad de veces que fueron nombradas comunas principales de destino (convirtiéndose así en zonas de alta convergencia de viajes) y a la alta cantidad de viajes originados por comuna que representan por cada categoría (tanto en cantidad total como en cantidad de viajes menores a 8 [km]), los nichos más importantes a analizar son en primer lugar, las comunas en común entre las cuatro categorías. Estas son Santiago, Las Condes, Ñuñoa, La Florida y Maipú. Otras comunas como Providencia y La Reina también se consideran ya que aparecen como importantes en al menos 3 categorías. Estas comunas poseen una gran cantidad de viajes cortos y una alta posibilidad de migrar hacia tecnologías de micromovilidad para cubrir el primer-último-kilómetro.

5 Selección de Puntos de Medición para Monitoreo

En cuanto a la implementación de las estaciones de monitoreo, se establecen 3 niveles, los que permiten obtener una escalabilidad en base a la cantidad de puntos definidos, considerando así, la posibilidad de ejecutar el plan mediante etapas. El alcance se limita al presupuesto otorgado y/o a la factibilidad técnica de instalación, asociada a las caracterices propias del lugar.

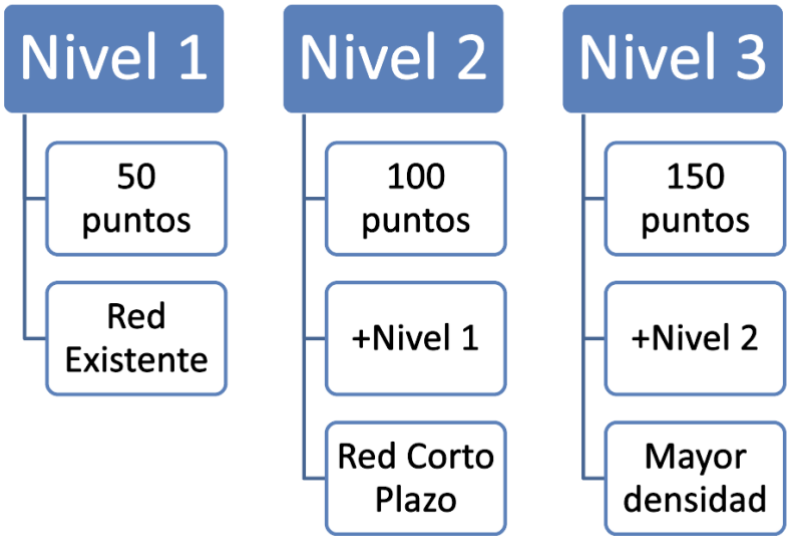


Figura 13: Selección de puntos en tres niveles

Para la selección de los puntos se utiliza una división sectorial, la que agrupa a las 34 comunas del Gran Santiago (Figura 14) en 9 sectores comunales. Dicha clasificación se encuentra presente en la Tabla 3 y, además, se puede visualizar la distribución en la Figura 15. Estos sectores son definidos y utilizados anteriormente en el "Modelo de Cálculo de Emisiones (MODEM)" (Departamento de Ingeniería Civil Mecánica Universidad de Chile, 2001).

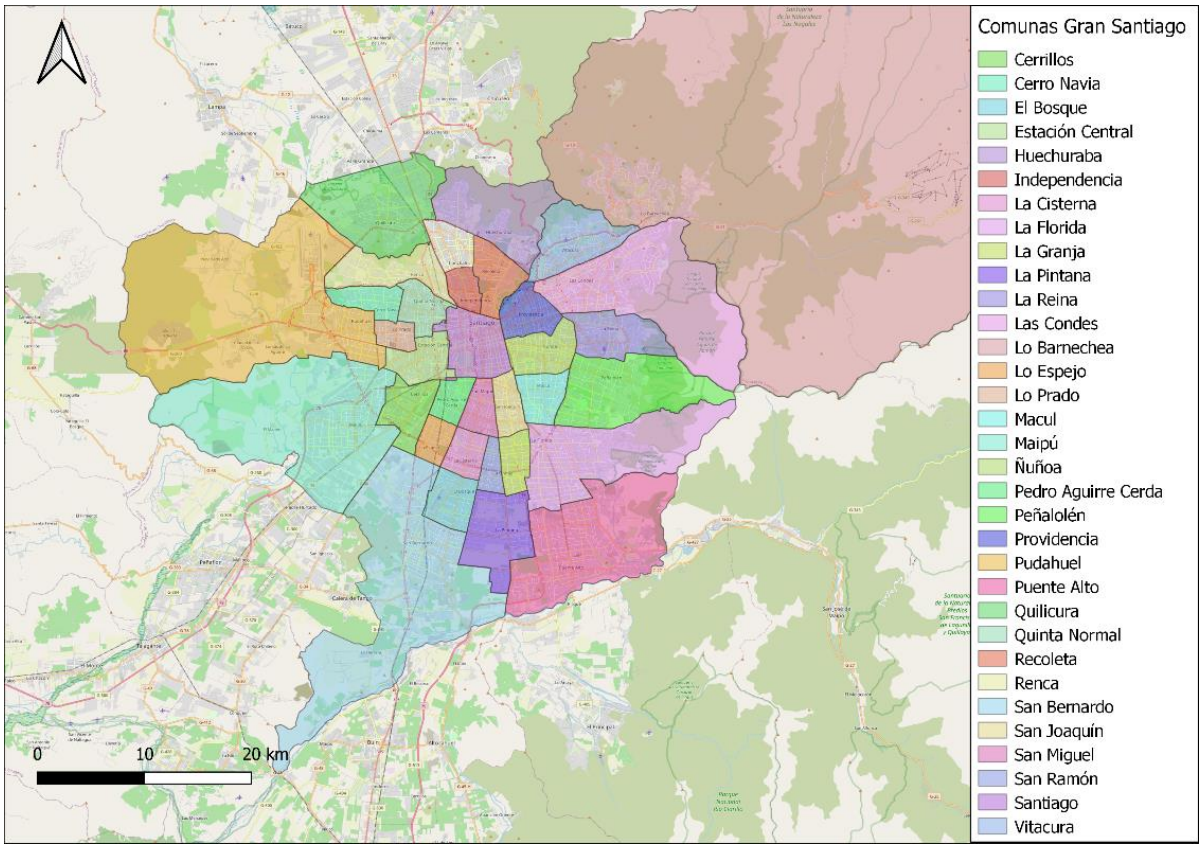


Figura 14: Comunas Gran Santiago.

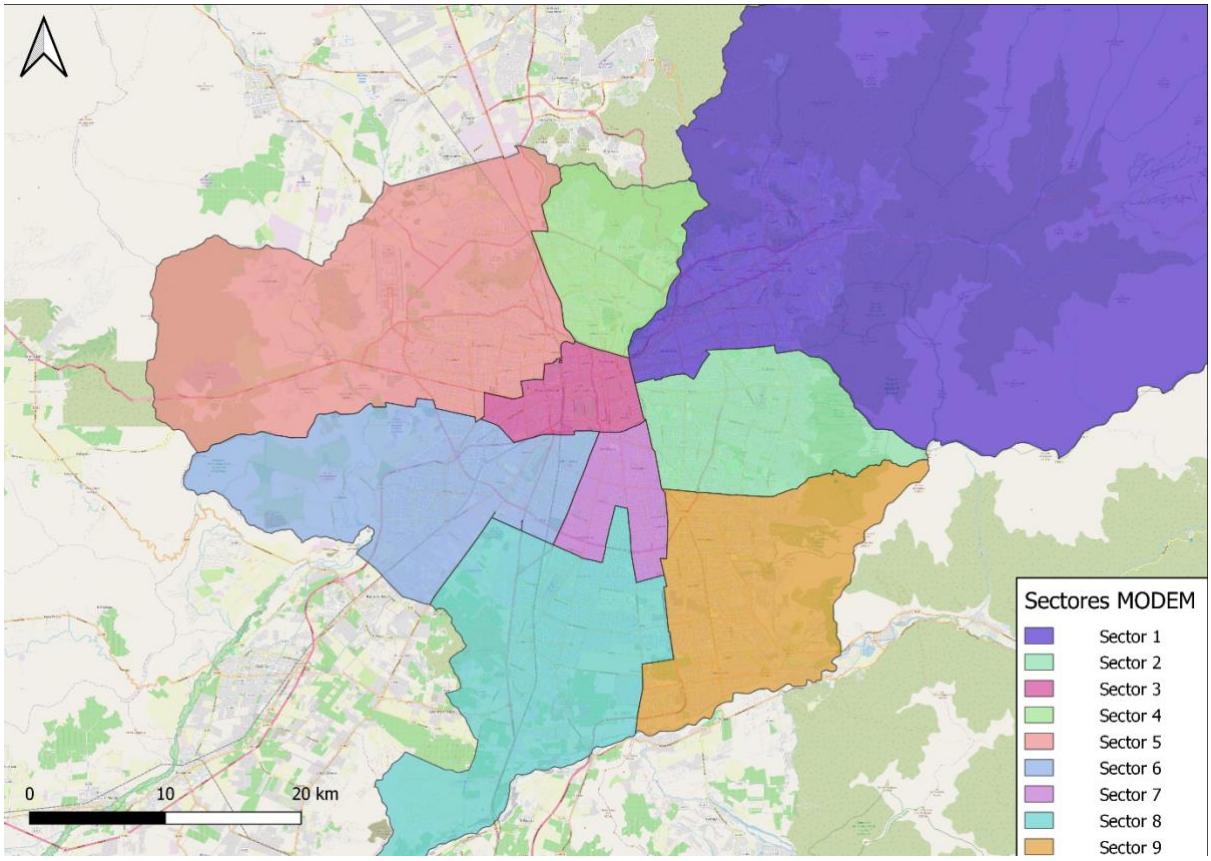


Figura 15: Sectores MODEM, agrupación de las 34 comunas, Gran Santiago.

Sector	Comuna
Sector 1	Las Condes
	Lo Barnechea
	Providencia
	Vitacura
Sector 2	La Reina
	Macul
	Ñuñoa
	Peñalolén
Sector 3	Estación Central
	Santiago
Sector 4	Conchalí
	Independencia
	Recoleta
	Huechuraba
Sector 5	Cerro Navia
	Pudahuel
	Quilicura
	Quinta Normal
	Renca
	Lo Prado

Sector 6	Maipú
	Cerrillos
	Lo Espejo
	Pedro Aguirre Cerda
Sector 7	La Cisterna
	La Granja
	San Joaquín
	San Miguel
Sector 8	El Bosque
	San Bernardo
	La Pintana
	San Ramon
Sector 9	La Florida
	Puente Alto

Tabla 3: Sectorización "MODEM"

Se observa como una buena oportunidad el uso de la infraestructura asociada a los instrumentos de la UOCT. Para lo cual se evalúa la coincidencia que estos poseen con las ciclovías, ya sean las existentes o las propuestas para ser desarrolladas en el corto plazo. Los instrumentos de monitoreo corresponden a cámaras de vigilancia y a espiras magnéticas, que detectan la presencia de vehículos. En ambos casos se pueden caracterizar según su estado, ya sea operativo o no operativo, de acuerdo al análisis efectuado a los instrumentos en diciembre del 2022. La distribución de dicho análisis se puede observar en la Figura 16 y en la Figura 17, donde se muestran las ubicaciones de cada instrumento, clasificándolos por su operabilidad.

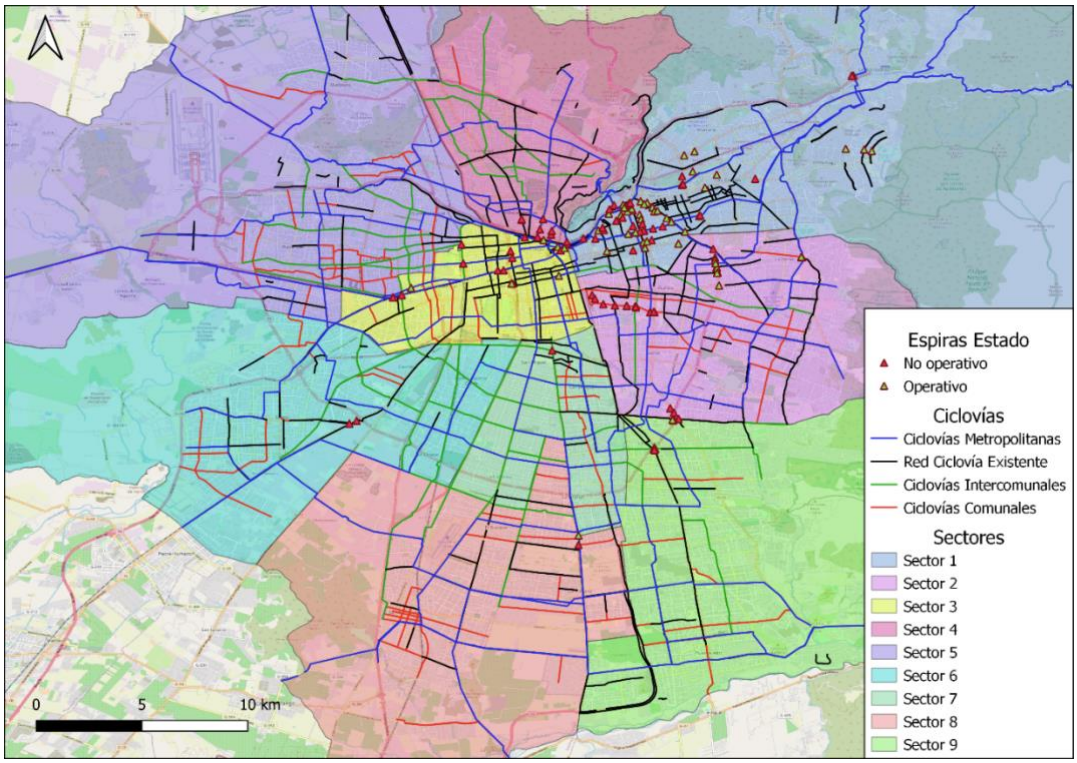


Figura 16: Espiras UOCT según su estado de operación, red de ciclovías y sectores MODEM.

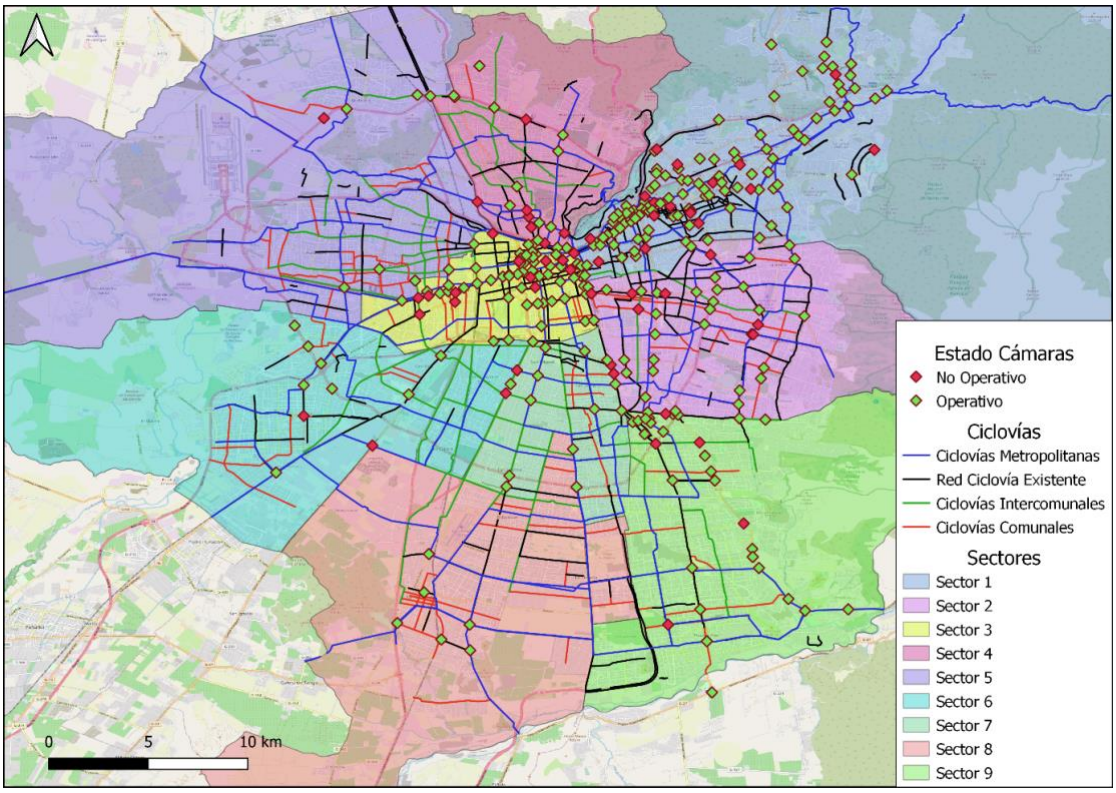


Figura 17: Cámaras UOCT según su estado de operación, red de ciclovías y sectores MODEM.

La Figura 18 junto a la Figura 19 permiten identificar visualmente la proporción de instrumentos UOCT que pueden ser utilizados para el monitoreo de las ciclovías, esto independiente de su estado. Aunque la mayoría de los instrumentos efectivamente están contenidos en una ciclovía, no existe una distribución homogénea dentro del Gran Santiago. Se tiene una coincidencia de aproximadamente un 80%. Por un lado, los sectores 1,2 y 3 presentan una mayor disponibilidad tanto de cámaras como de espiras, existiendo incluso ciclovías con múltiples puntos de medición o comunas observadas que superan las 50 cámaras, de un total regional de 318 y, por otro lado, en sectores con menor presencia de monitoreo se observan comunas que no poseen ni cámaras ni espiras, estas representan el 11% del Gran Santiago.

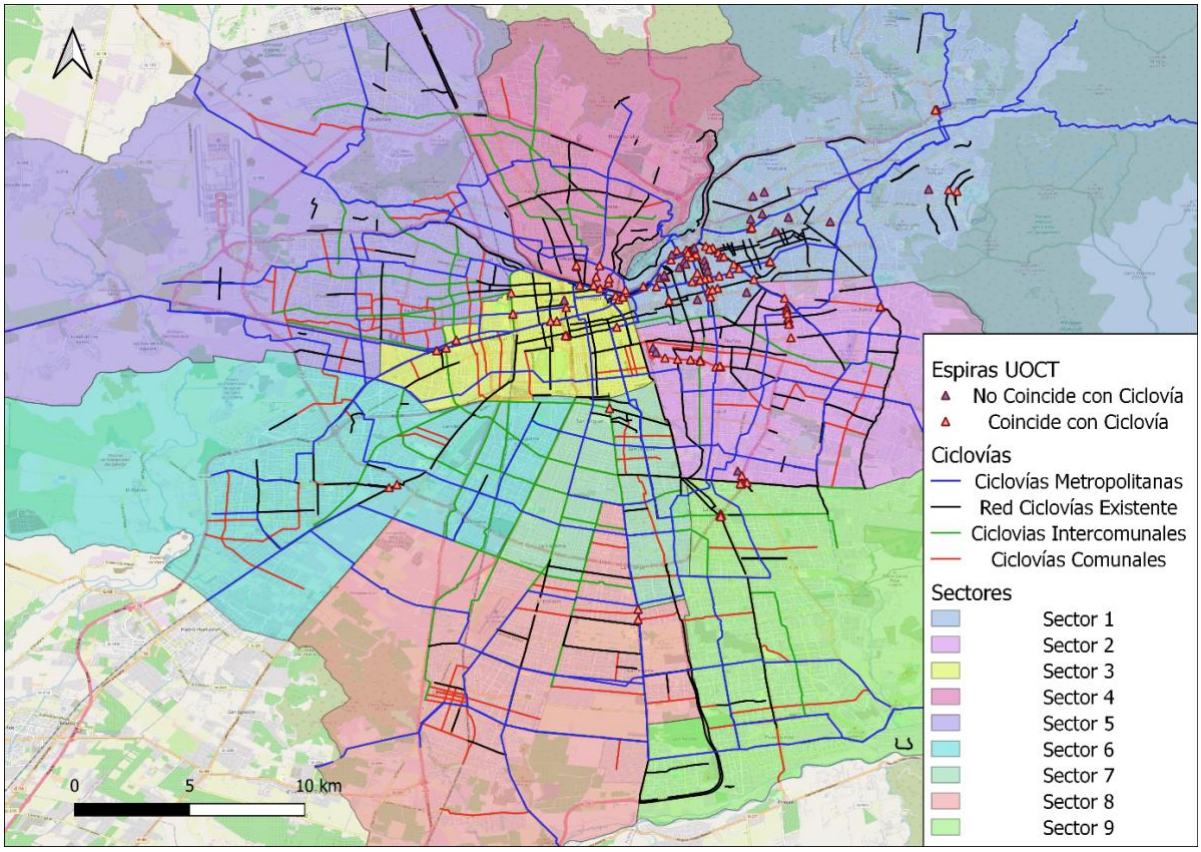


Figura 18: Espiras UOCT según coincidencia con ciclovías, red de ciclovías y sectores MODEM.

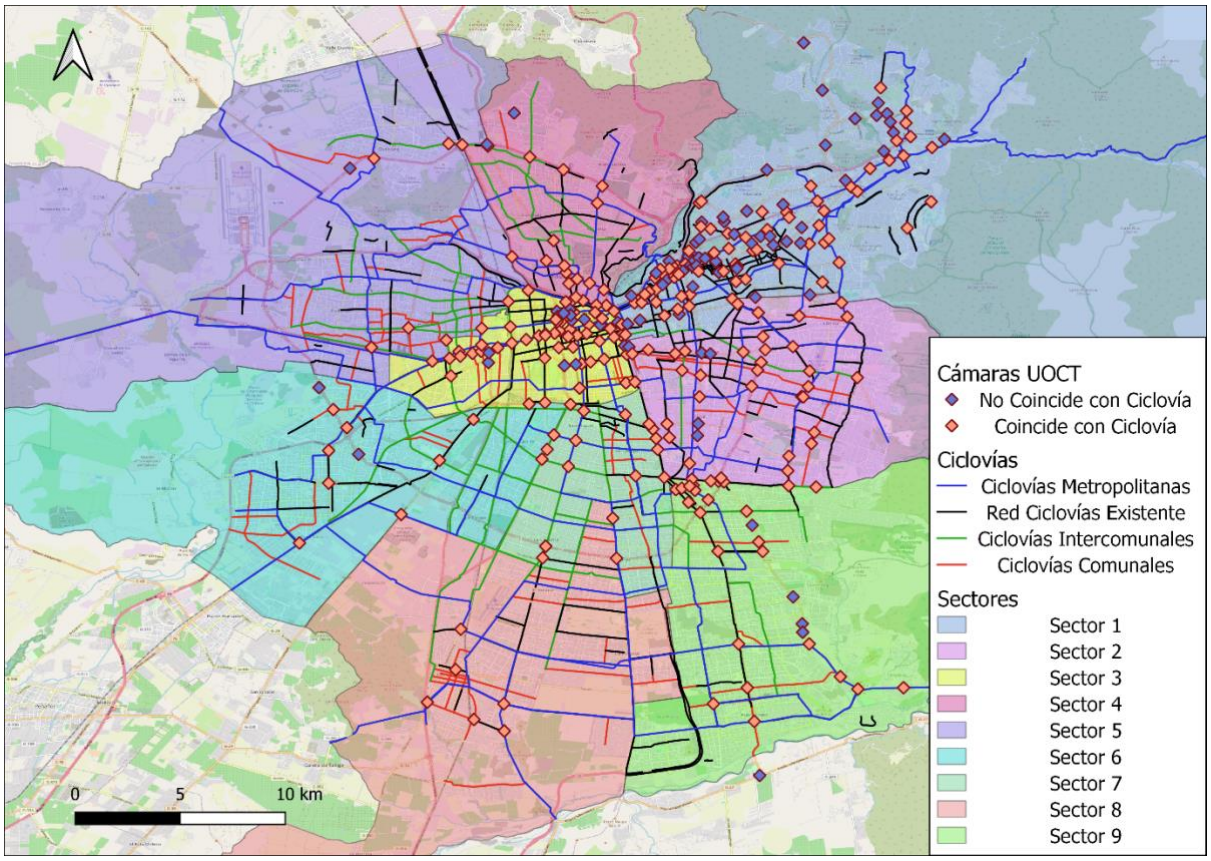


Figura 19: Cámaras UOCT según coincidencia con ciclovías, red de ciclovías y sectores MODEM.

5.1 Nivel 1: 50 Puntos

En el primer nivel se considera una red de 50 puntos de medición. En este nivel inicial, la distribución de las estaciones se realiza en base a los 9 sectores comunales, donde a cada sector se le asignan de manera preliminar 5 puntos de medición, considerando como criterio principal la presencia de ciclovías existentes, y además, la coincidencia con ambos instrumentos de monitoreo UOCT, sin importar si es que estos se encuentran operativos o no, puesto que, su relevancia radica en el uso de la infraestructura y posible reactivación de equipos sin operar.

Se considera que una cámara coincide con una espira, si es que estas se encuentran a una distancia inferior a 125 metros o que estén contenidas dentro de un mismo eje vial, modelado según "Estraus" (modelo de equilibrio Oferta-Demanda para redes multimodales de transporte urbano con múltiples clases de usuario). La coincidencia de ambos instrumentos solo ocurre en 15 puntos, por lo que la siguiente búsqueda que se lleva a cabo es para puntos en los que se cuente únicamente con la presencia de cámaras dentro de la ciclovía, y dado que con este análisis tampoco se logra completar la cantidad de estaciones establecidas, se agregan ubicaciones de interés en la que no hay instrumentos UOCT. Cabe mencionar que existen sectores en donde los ejes asociados a las ciclovías existentes no se encuentran monitoreados por la UOCT, por ende, se decide buscar la coincidencia de instrumentos con la red de ciclovías a corto plazo, además, como criterios adicionales se tiene lo siguiente:

- Emisiones, NO_x y MP.
- Flujo vehicular.
- Otros puntos de monitoreo.

La capa de emisiones corresponde a los valores calculados en base a los factores de emisión provistos por la herramienta COPERT, la cual corresponde a la calculadora estándar de la Unión Europea para medir las emisiones y consumo de energía de vehículos en una zona geográfica específica. En este caso, se utiliza información respectiva al año 2022 y estableciendo como límite geográfico la región Metropolitana. La modelación se ejecuta utilizando una resolución de 460x460[m].

La distribución de las emisiones modeladas se puede observar en la Figura 20, donde los cuadrados dentro del mapa reflejan la resolución y cada tonalidad del color observado corresponde a un valor especifico dentro del rango establecido, el cual indica un valor mayor para tonos más oscuros y uno inferior para tonalidades suaves. En este caso para la visualización se omite el 10% inferior de las emisiones. Se tiene como unidad de medida [Gg/año].

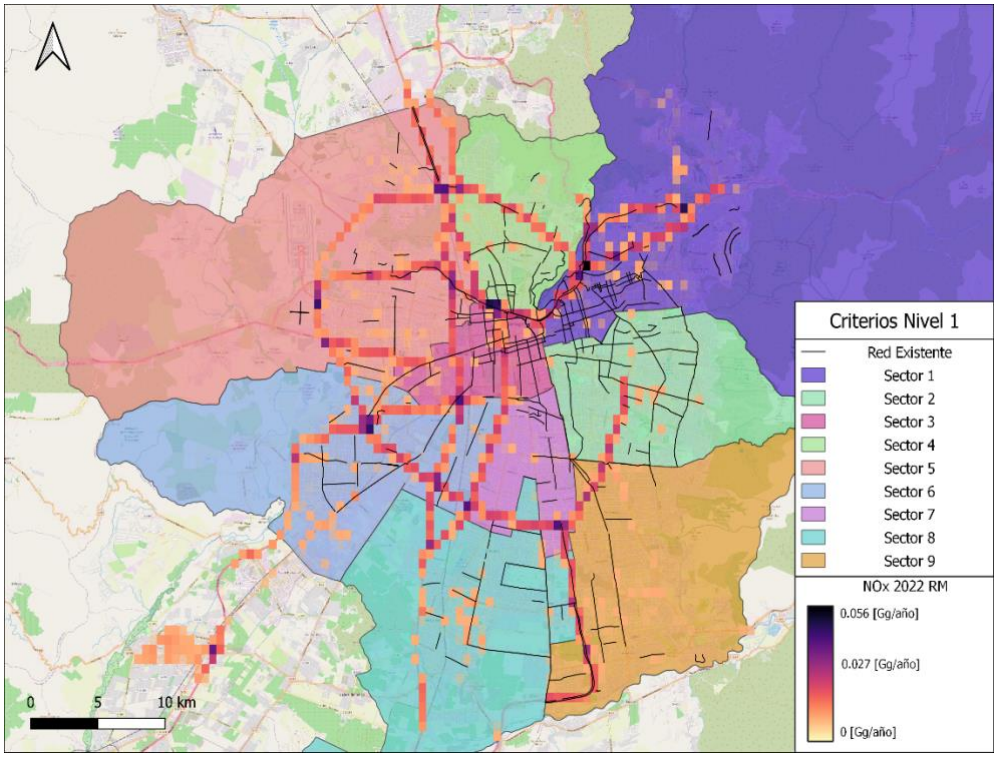


Figura 20: Criterios para el nivel 1; red de ciclovías existentes, emisiones NOx y sectores MODEM.

El flujo vehicular, a su vez, se representa visualmente según la información obtenida mediante "Estraus", para el año 2022. Tanto en la Figura 21 como en la Figura 22 se presenta el flujo total. Para el primer caso, se tiene un análisis en el horario punta (mañana) y en el segundo caso, fuera de punta. En ambas modelaciones se establece una categorización por tamaño de eje, donde la variación en el grosor de las líneas representa la magnitud del flujo. Un mayor tamaño en las líneas se asocia con un mayor. El flujo observado corresponde a la unión del flujo fijo con el variable, ambos medidos en [vehículos/hora]. Es importante mencionar que el tamaño de línea es comparable únicamente para cada figura, según su propia escala establecida, la que está presente en sus respectivas leyendas. Esto se debe a que en cada horario las cantidades y los rangos de flujo difieren, por ende, no es posible identificar de manera visual en qué periodo de tiempo existe mayor o menor flujo.

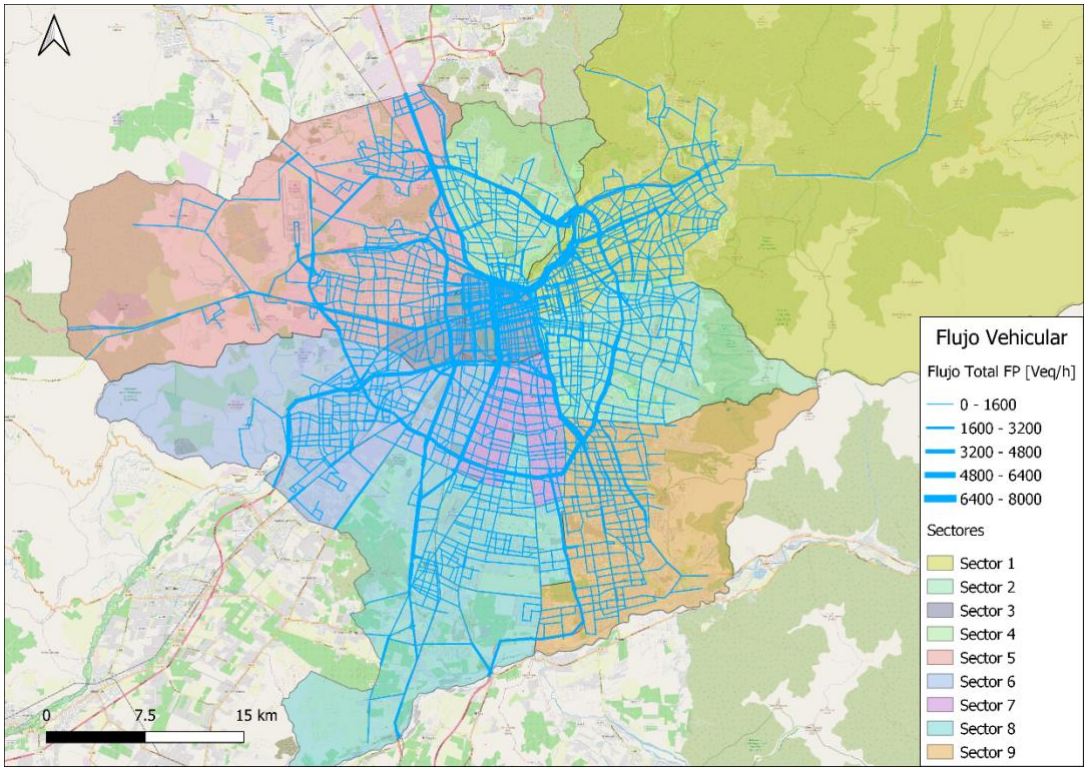


Figura 21: Flujo vehicular total en horario fuera de punta y sectores MODEM.

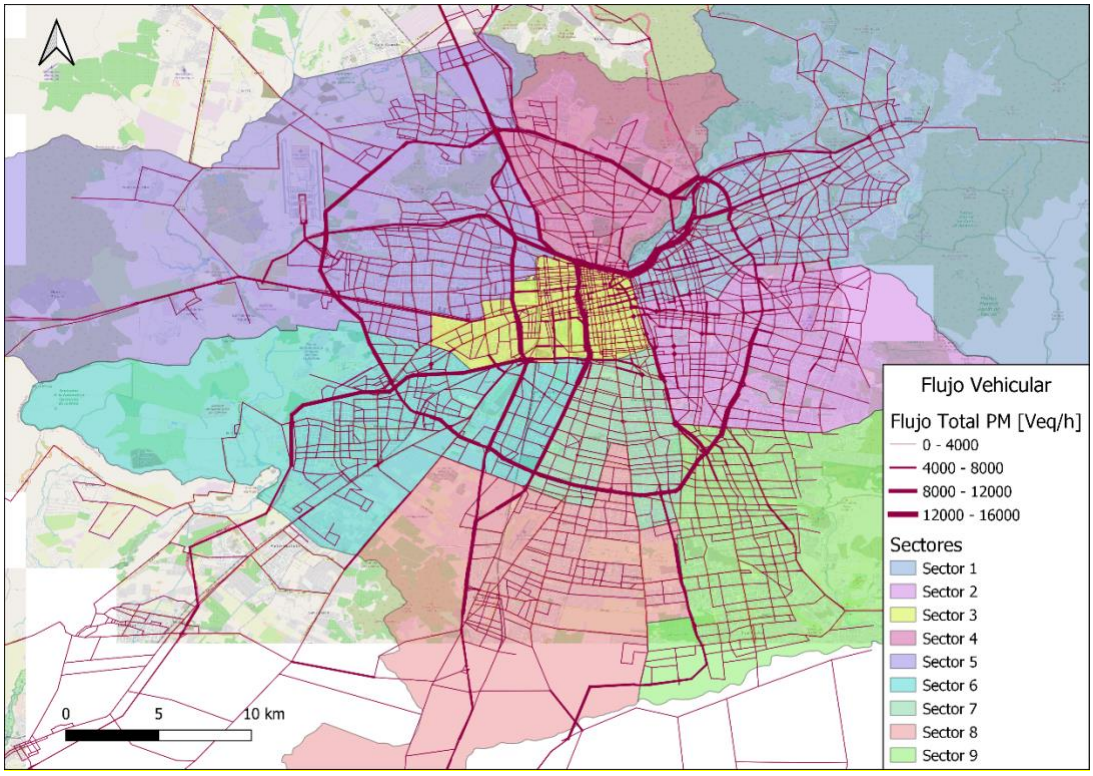


Figura 22: Flujo vehicular total en horario punta mañana y sectores MODEM.

Con respecto a los otros puntos de monitoreo, se presentan las ubicaciones asociadas a las mediciones de flujo y clasificación vehicular realizadas en la actualización del "MODEM" en el año 2001. También se incluyen los lugares con mayor contaminación, según los trabajos de título; "Exposición de ciclistas a material particulado y carbono negro en Santiago" (Salvatierra, 2016) y "Impacto del diseño de ciclovías en la exposición de usuarios a contaminantes del aire con sensores portátiles" (Gutiérrez G. , 2023).

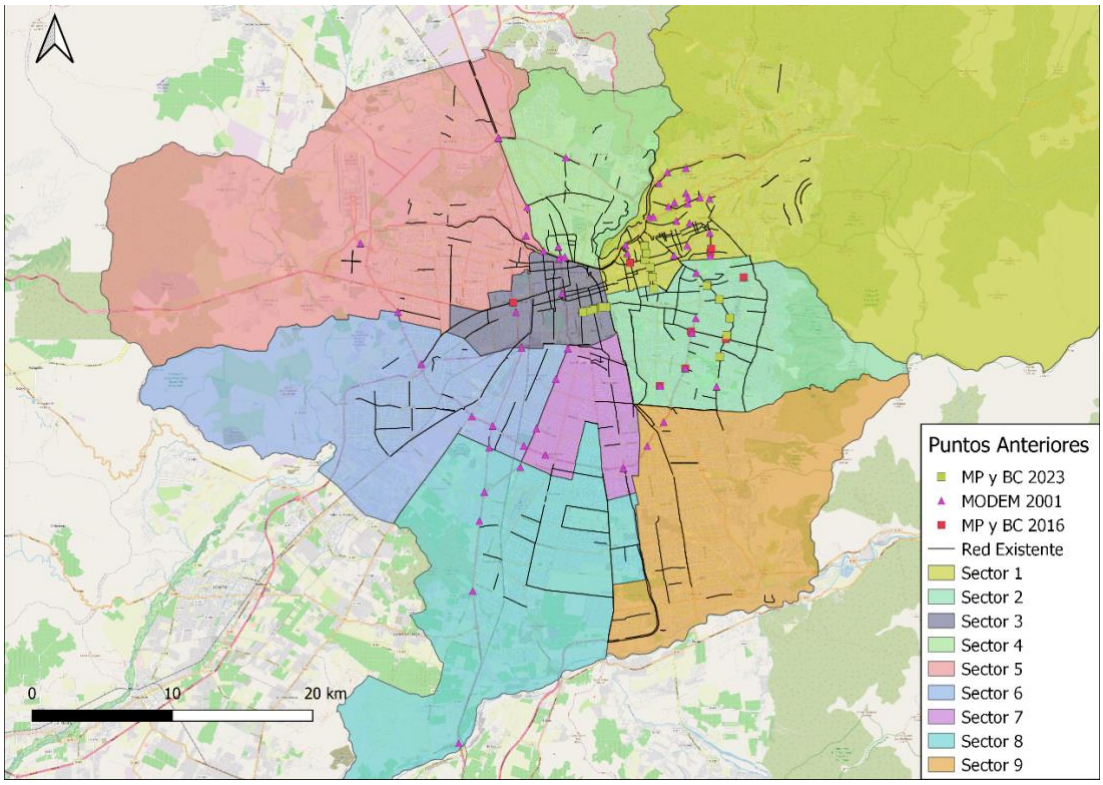


Figura 23: Mediciones realizadas en estudios anteriores y sectores "MODEM".

Los criterios adicionales permiten orientar la decisión, sobre todo, para los casos en los que se evalúa un área de interés no monitoreada por la UOCT y se deba asignar la estación de monitoreo en dicha ubicación. En cuanto a la metodología de selección, se define un mayor interés en las ubicaciones que además de contar con un eje de ciclovías, exista una alta cantidad de emisión y/o flujo vehicular observable visualmente. En la primera revisión se atribuyen 45 puntos útiles para el proyecto. Continuando con el análisis, en base a los criterios presentados, y manteniendo la secuencia asociada a la presencia o no de los instrumentos UOCT, se asignan los 5 puntos faltantes para completar el primer nivel de la red.

5.2 Niveles 2 y 3: 100 y 150 Puntos

Para el nivel 2 de la red, se espera obtener un total de 100 estaciones de monitoreo, por lo que, se busca agregar 50 nuevos puntos adicionales a las ubicaciones ya definidas en el nivel 1. Sin embargo, para esta etapa la distribución inicial posee como límite territorial las comunas del Gran Santiago, donde se entrega prioridad a las comunas que no presentan una ubicación definida para la

medición, y que, nuevamente, cumplan con los criterios establecidos para realizar el monitoreo, que en este caso no solo considera la red de ciclovías existentes, sino que también, al conjunto de ejes que serán desarrollados en el corto plazo, subdivididos en ciclovías comunales, intercomunales y metropolitanas. Las trayectorias recorridas en dichas ciclovías se pueden visualizar en la Figura 24.

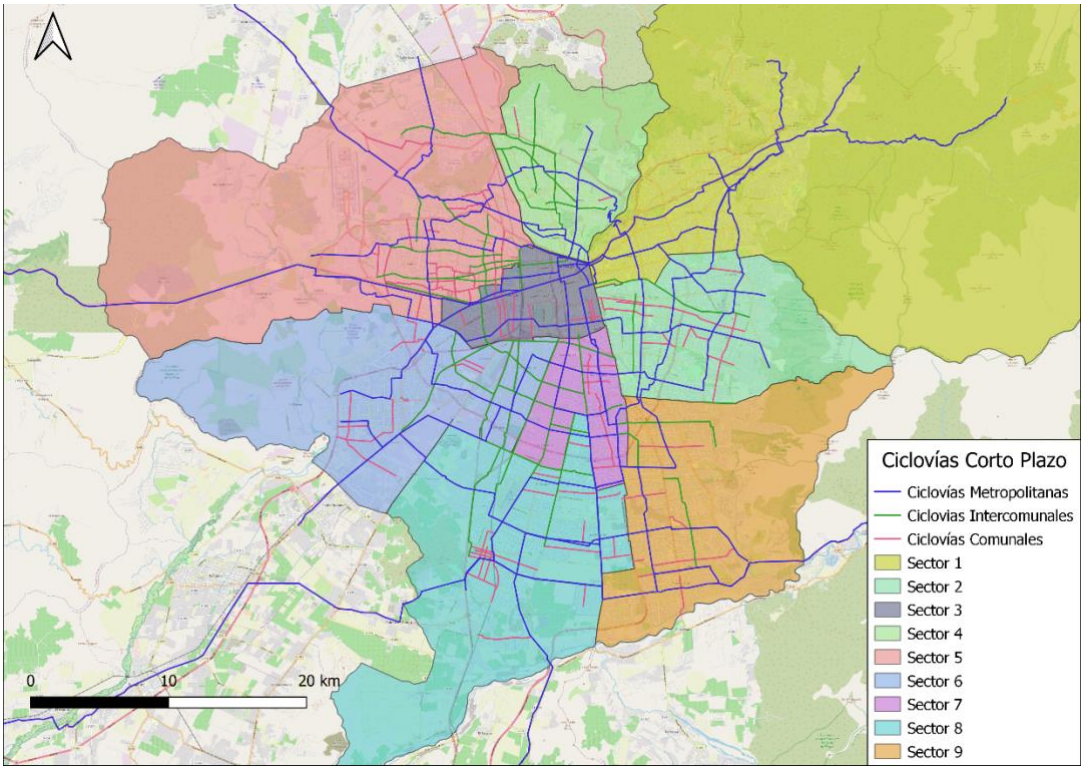


Figura 24: Ciclovías metropolitanas, intercomunales y comunales en desarrollo a corto plazo y sectores "MODEM".

De igual manera que en el nivel anterior, se comienza con la selección considerando los sitios en donde las ciclovías coincidan tanto con espiras, como con cámaras y luego se continua el análisis para la coincidencia solo con cámara, finalmente se realiza la búsqueda para puntos que no están cubiertos por ninguno de los dos instrumentos.

Para las ubicaciones restantes se considera la división sectorial y se asignan los puntos de medición según lo establecido. Este nivel permite asegurar que en cada comuna del Gran Santiago exista al menos un punto de monitoreo, ya sea perteneciente al sistema UOCT o uno totalmente nuevo.

De forma análoga al nivel 2, para la última etapa de selección (Nivel 3) se establecen las estaciones para el monitoreo, hasta lograr los 150 puntos finales.

Como resultado final se puede visualizar los puntos seleccionados por nivel, entregados en la Figura 25 y en Figura 26, considerando una división territorial por sectores y otra por comuna, respectivamente.

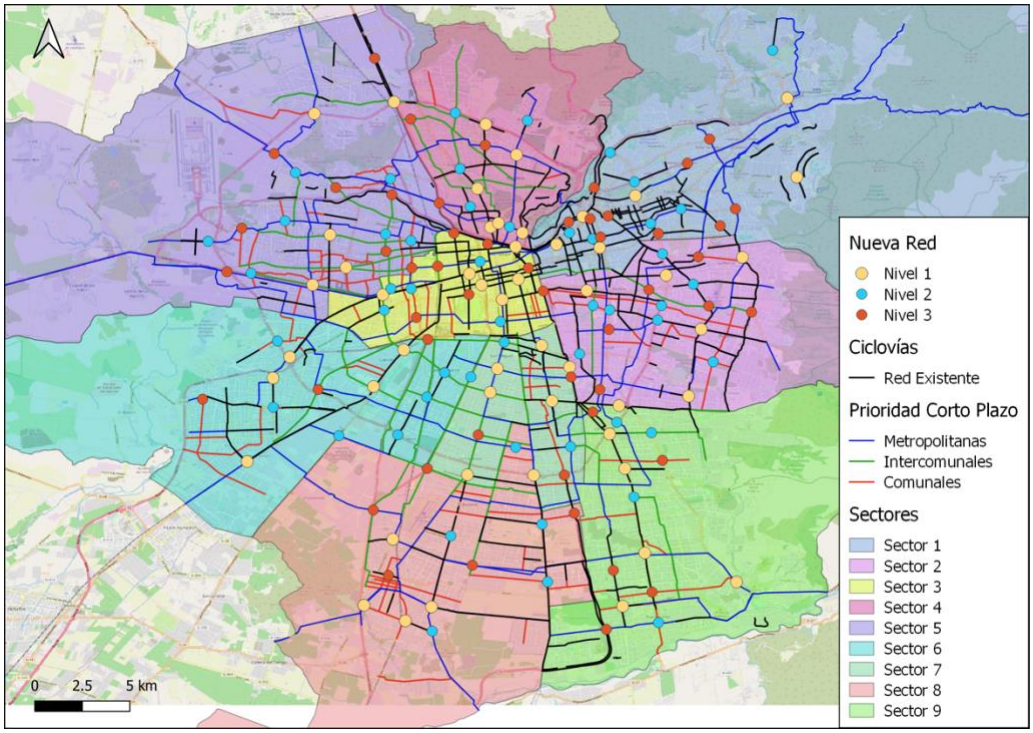


Figura 25: Escalabilidad de la red de monitoreo, ciclovías existentes, ciclovías corto plazo y sectores "MODEM".

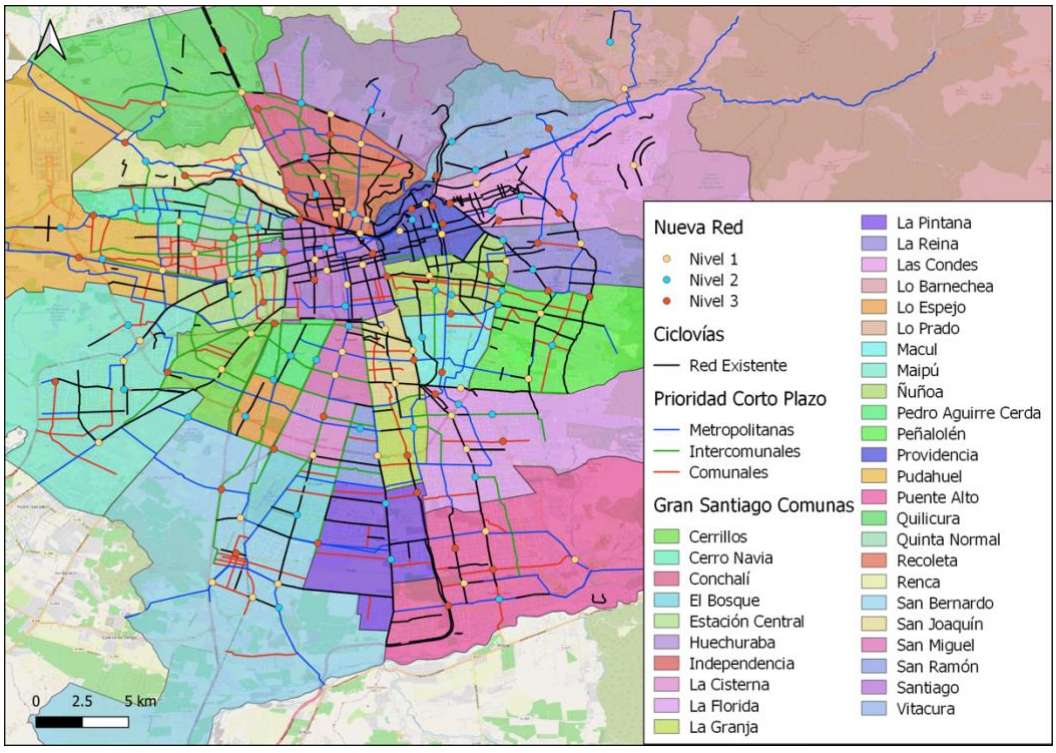


Figura 26: Escalabilidad de la red de monitoreo, ciclovías existentes, ciclovías corto plazo y comunas Gran Santiago.

En el primer nivel solo existe un punto independiente de la UOCT, en cambio en los niveles superiores son alrededor de 20 puntos por nivel los que no coinciden con los instrumentos actuales. A pesar de la oportunidad de aprovechar la infraestructura, se considera relevante la posibilidad de expandir y evaluar otros lugares con gran densidad de ciclovías ya sean existentes o proyectadas.

5.3 Listado Niveles 1, 2 y 3

El listado de los 150 puntos, indicando el nivel, sus coordenadas y comuna a la cual pertenecen, se lista a continuación:

ID	Nivel	feature_x	feature_y	Comuna	Sector
101	Nivel 1	-70,5099004	-33,4014994	Las Condes	Sector 1
102	Nivel 1	-70,623445	-33,4333833	Providencia	Sector 1
103	Nivel 1	-70,6030743	-33,434943	Providencia	Sector 1
104	Nivel 1	-70,5862088	-33,4103699	Las Condes	Sector 1
105	Nivel 1	-70,5143982	-33,3641914	Lo Barnechea	Sector 1
121	Nivel 1	-70,6110496	-33,4201999	Providencia	Sector 1
261	Nivel 2	-70,5738779	-33,4623883	Ñuñoa	Sector 2
431	Nivel 2	-70,6371841	-33,374799	Huechuraba	Sector 4
461	Nivel 2	-70,6690466	-33,3975733	Conchalí	Sector 4
531	Nivel 2	-70,788103	-33,4319253	Pudahuel	Sector 5
532	Nivel 2	-70,7468404	-33,3994607	Renca	Sector 5
533	Nivel 2	-70,6921997	-33,4316267	Quinta Normal	Sector 5
561	Nivel 2	-70,7517732	-33,4222222	Cerro Navia	Sector 5
562	Nivel 2	-70,7678013	-33,4470194	Pudahuel	Sector 5
171	Nivel 3	-70,6177	-33,4228	Providencia	Sector 1
172	Nivel 3	-70,6076	-33,4213	Providencia	Sector 1
173	Nivel 3	-70,6027	-33,4299	Providencia	Sector 1
174	Nivel 3	-70,5991	-33,42	Las Condes	Sector 1
181	Nivel 3	-70,5388915	-33,4165628	Las Condes	Sector 1
182	Nivel 3	-70,5511	-33,3836	Vitacura	Sector 1
183	Nivel 3	-70,5461343	-33,4246191	Las Condes	Sector 1
184	Nivel 3	-70,5616113	-33,3949555	Vitacura	Sector 1
191	Nivel 3	-70,6056968	-33,4065676	Vitacura	Sector 1
192	Nivel 3	-70,5753377	-33,4282721	Las Condes	Sector 1
201	Nivel 1	-70,5355893	-33,4395017	La Reina	Sector 2
202	Nivel 1	-70,5716399	-33,4480399	La Reina	Sector 2
211	Nivel 1	-70,5550952	-33,4735031	Peñalolén	Sector 2
212	Nivel 1	-70,5610367	-33,5051951	Peñalolén	Sector 2
213	Nivel 1	-70,6172741	-33,4914098	Macul	Sector 2
221	Nivel 1	-70,6091268	-33,4552303	Ñuñoa	Sector 2
563	Nivel 2	-70,7019451	-33,4023174	Renca	Sector 5
564	Nivel 2	-70,7042499	-33,4285141	Quinta Normal	Sector 5
631	Nivel 2	-70,6984154	-33,5235	Lo Espejo	Sector 6
632	Nivel 2	-70,6763861	-33,4940596	Pedro Aguirre Cerda	Sector 6
661	Nivel 2	-70,6847703	-33,5056326	Pedro Aguirre Cerda	Sector 6
731	Nivel 2	-70,616772	-33,5290808	La Granja	Sector 7
831	Nivel 2	-70,6734495	-33,5713542	El Bosque	Sector 8
281	Nivel 3	-70,6297475	-33,4554461	Ñuñoa	Sector 2
282	Nivel 3	-70,5987	-33,4736	Ñuñoa	Sector 2
283	Nivel 3	-70,579836	-33,454817	Ñuñoa	Sector 2
284	Nivel 3	-70,556484	-33,4392913	La Reina	Sector 2
285	Nivel 3	-70,5313	-33,4654	La Reina	Sector 2
286	Nivel 3	-70,5515124	-33,4625061	La Reina	Sector 2
287	Nivel 3	-70,603	-33,5021	Macul	Sector 2

301	Nivel 1	-70,641486	-33,4498093	Santiago	Sector 3
302	Nivel 1	-70,6589059	-33,4525915	Santiago	Sector 3
303	Nivel 1	-70,6646	-33,4473	Santiago	Sector 3
304	Nivel 1	-70,6427986	-33,4344994	Santiago	Sector 3
305	Nivel 1	-70,7055892	-33,4571957	Estación Central	Sector 3
321	Nivel 1	-70,6490888	-33,459486	Santiago	Sector 3
832	Nivel 2	-70,6303145	-33,5657893	La Pintana	Sector 8
833	Nivel 2	-70,642761	-33,5294	San Ramón	Sector 8
861	Nivel 2	-70,6277169	-33,5930333	La Pintana	Sector 8
961	Nivel 2	-70,5868815	-33,5528997	La Florida	Sector 9
131	Nivel 2	-70,5981643	-33,3899588	Vitacura	Sector 1
371	Nivel 3	-70,6796	-33,4437	Santiago	Sector 3
381	Nivel 3	-70,6367479	-33,4445321	Santiago	Sector 3
382	Nivel 3	-70,656011	-33,4331718	Santiago	Sector 3
383	Nivel 3	-70,6649	-33,4571	Santiago	Sector 3
384	Nivel 3	-70,691848	-33,4444895	Estación Central	Sector 3
391	Nivel 3	-70,6897744	-33,4679949	Estación Central	Sector 3
392	Nivel 3	-70,6842944	-33,4783628	Pedro Aguirre Cerda	Sector 6
401	Nivel 1	-70,6546409	-33,4252302	Independencia	Sector 4
411	Nivel 1	-70,6568964	-33,3765957	Conchalí	Sector 4
412	Nivel 1	-70,6607867	-33,4069839	Independencia	Sector 4
413	Nivel 1	-70,6509288	-33,4233169	Recoleta	Sector 4
414	Nivel 1	-70,6395605	-33,4278954	Recoleta	Sector 4
421	Nivel 1	-70,6423429	-33,3910427	Recoleta	Sector 4
141	Nivel 2	-70,6063837	-33,4307684	Providencia	Sector 1
142	Nivel 2	-70,578963	-33,423486	Las Condes	Sector 1
151	Nivel 2	-70,5213362	-33,3415375	Lo Barnechea	Sector 1
152	Nivel 2	-70,5647	-33,4166	Las Condes	Sector 1
153	Nivel 2	-70,5588	-33,4522	La Reina	Sector 2
481	Nivel 3	-70,6789	-33,4138	Independencia	Sector 4
491	Nivel 3	-70,6923658	-33,3741079	Conchalí	Sector 4
492	Nivel 3	-70,6571426	-33,3864819	Conchalí	Sector 4
511	Nivel 1	-70,7229454	-33,4442603	Lo Prado	Sector 5
512	Nivel 1	-70,7387225	-33,4525183	Lo Prado	Sector 5
513	Nivel 1	-70,737873	-33,3715708	Quilicura	Sector 5
514	Nivel 1	-70,7002291	-33,3659895	Quilicura	Sector 5
520	Nivel 1	-70,7304563	-33,4288674	Cerro Navia	Sector 5
154	Nivel 2	-70,6174	-33,4279	Providencia	Sector 1
155	Nivel 2	-70,5866	-33,4038	Vitacura	Sector 1
241	Nivel 2	-70,6062	-33,4623	Ñuñoa	Sector 2
243	Nivel 2	-70,5734107	-33,4378551	La Reina	Sector 2
244	Nivel 2	-70,5983	-33,4644	Ñuñoa	Sector 2
251	Nivel 2	-70,5494715	-33,4889735	Peñalolén	Sector 2
252	Nivel 2	-70,6126	-33,4852	Macul	Sector 2
581	Nivel 3	-70,672	-33,4281	Quinta Normal	Sector 5
591	Nivel 3	-70,7792175	-33,4463314	Pudahuel	Sector 5
592	Nivel 3	-70,727777	-33,4065244	Renca	Sector 5
593	Nivel 3	-70,7568208	-33,3904001	Renca	Sector 5
594	Nivel 3	-70,7721937	-33,4257395	Pudahuel	Sector 5
595	Nivel 3	-70,7040471	-33,4366636	Quinta Normal	Sector 5

596	Nivel 3	-70,7093876	-33,3453395	Quilicura	Sector 5
597	Nivel 3	-70,7012222	-33,4099125	Quinta Normal	Sector 5
611	Nivel 1	-70,6956459	-33,4832733	Cerrillos	Sector 6
612	Nivel 1	-70,7574589	-33,4966059	Maipú	Sector 6
613	Nivel 1	-70,7696421	-33,536158	Maipú	Sector 6
614	Nivel 1	-70,7099161	-33,5006344	Cerrillos	Sector 6
615	Nivel 1	-70,7494921	-33,4866873	Maipú	Sector 6
253	Nivel 2	-70,5757225	-33,4691696	Peñalolén	Sector 2
341	Nivel 2	-70,7016932	-33,4543313	Estación Central	Sector 3
342	Nivel 2	-70,6596	-33,4415	Santiago	Sector 3
351	Nivel 2	-70,6921502	-33,454307	Estación Central	Sector 3
352	Nivel 2	-70,65	-33,4699	Santiago	Sector 3
353	Nivel 2	-70,7048944	-33,464515	Estación Central	Sector 3
432	Nivel 2	-70,6713	-33,3712	Conchalí	Sector 4
691	Nivel 3	-70,7907081	-33,5066571	Maipú	Sector 6
692	Nivel 3	-70,7361065	-33,5020825	Cerrillos	Sector 6
711	Nivel 1	-70,6655669	-33,5424281	La Cisterna	Sector 7
712	Nivel 1	-70,6256366	-33,5074732	San Joaquín	Sector 7
713	Nivel 1	-70,63047	-33,4812178	San Joaquín	Sector 7
714	Nivel 1	-70,6513961	-33,492151	San Miguel	Sector 7
715	Nivel 1	-70,6548013	-33,5033983	San Miguel	Sector 7
441	Nivel 2	-70,645637	-33,425072	Recoleta	Sector 4
451	Nivel 2	-70,6642	-33,4155	Independencia	Sector 4
781	Nivel 3	-70,6166	-33,4961	San Joaquín	Sector 7
791	Nivel 3	-70,6197487	-33,5425332	La Granja	Sector 7
792	Nivel 3	-70,660428	-33,5235275	La Cisterna	Sector 7
811	Nivel 1	-70,682535	-33,6049156	San Bernardo	Sector 8
812	Nivel 1	-70,6948788	-33,611506	San Bernardo	Sector 8
813	Nivel 1	-70,7144358	-33,6041478	San Bernardo	Sector 8
814	Nivel 1	-70,7008	-33,5729	San Bernardo	Sector 8
815	Nivel 1	-70,6342244	-33,5426019	San Ramón	Sector 8
651	Nivel 2	-70,6639	-33,4961	San Miguel	Sector 7
652	Nivel 2	-70,7263	-33,5239	Cerrillos	Sector 6
653	Nivel 2	-70,7573	-33,5105	Maipú	Sector 6
654	Nivel 2	-70,7553	-33,4791	Maipú	Sector 6
751	Nivel 2	-70,6482	-33,4796	San Miguel	Sector 7
881	Nivel 3	-70,7029113	-33,5900156	San Bernardo	Sector 8
891	Nivel 3	-70,7100465	-33,5590317	San Bernardo	Sector 8
892	Nivel 3	-70,6150258	-33,5605581	La Pintana	Sector 8
893	Nivel 3	-70,6632448	-33,5852157	La Pintana	Sector 8
894	Nivel 3	-70,6845607	-33,5394293	El Bosque	Sector 8
901	Nivel 1	-70,5983767	-33,5230885	La Florida	Sector 9
902	Nivel 1	-70,5939187	-33,5097086	La Florida	Sector 9
911	Nivel 1	-70,5384055	-33,5931227	Puente Alto	Sector 9
912	Nivel 1	-70,591125	-33,5394472	La Florida	Sector 9
913	Nivel 1	-70,5817466	-33,5793532	Puente Alto	Sector 9
921	Nivel 1	-70,5921976	-33,6045866	Puente Alto	Sector 9
851	Nivel 2	-70,6822014	-33,6163997	San Bernardo	Sector 8
951	Nivel 2	-70,5752851	-33,6123304	Puente Alto	Sector 9
952	Nivel 2	-70,595	-33,5176	La Florida	Sector 9

953	Nivel 2	-70,5786	-33,5225	La Florida	Sector 9
981	Nivel 3	-70,5734	-33,5356	La Florida	Sector 9
982	Nivel 3	-70,5783	-33,5979	Puente Alto	Sector 9
983	Nivel 3	-70,6063	-33,5127	La Florida	Sector 9
991	Nivel 3	-70,5965925	-33,587634	Puente Alto	Sector 9
992	Nivel 3	-70,5999396	-33,6155045	Puente Alto	Sector 9

Tabla 4: Listado de los 150 puntos, indicando el nivel, sus coordenadas y comuna a la cual pertenecen.

6 Costos Dispositivos Electrónicos

Para la determinación de los costos para sensores de calidad de aire se establecieron dos caminos. El primero, fue contactar compañías que realizan estos trabajos "llave en mano", es decir, que incluyen el hardware, la instalación, conexión a la red eléctrica, comunicación y un software de monitoreo. La segunda manera fue valorar los costos de cada componente de manera individual.

Adicionalmente, se agregan los costos para un sistema de conteo de vehículos, utilizando GPU, cámara y software YOLO. Este sistema realiza procesamiento de imágenes para identificar vehículos, bicicletas y peatones, realizando conteos en tiempo real, borrando los videos para así transmitir únicamente los números de cada categoría bajo análisis. El sistema seleccionado es Jetson Nano con GPU Nvidia y YOLO versión 5.0.

6.1 Sistemas de Calidad de Aire

6.1.1 Costos Sistemas Llave en Mano

Distintos proveedores internacionales con experiencia previa en este tipo de proyectos fueron contactados. La solicitud fue que entregasen una cotización por una solución llave en mano que incluyese tanto los equipos instalados y conectados, como una plataforma de monitoreo donde revisar y procesar estos datos.

Dentro de los antecedentes compartidos por ellos, se mencionó la necesidad del Gobierno Metropolitano de conectar las ciclovías existentes en Santiago y convertirlas en ciclovías inteligentes mediante la instalación de un plan piloto que conste con 50 a 150 estaciones de monitoreo de emisiones con sensores de bajo costo, las cuales debían como mínimo ser capaces de medir MP1, MP2.5, MP10, O_3 y NO_2, tener carcasas IP, comunicación vía 3G/4G y medir temperatura y humedad ambiente. La entrega de energía eléctrica sería desde los postes de luz o semáforos existentes en el área estudio.

Las compañías contactadas fueron Kunak (España), AQMesh (Reino Unido), QuantAQ y Clarity (Estados Unidos).

Kunak trabaja con un partner local llamado Sercoamb Ltda., los cuales se encargarían de la provisión de 150 equipos **Kunak Air Lite** con su respectiva instalación, calibración y un Software con licencia Anual para el para gestión de datos. Los costos son de CLP 3.630.792 por cada equipo, lo que totaliza CLP 544.618.750 en total por la operación de un año. La provisión de sistemas solares tiene un costo adicional de CLP 150.000.

QuantAQ Inc. envió una cotización por 150 **MODULAIR-Global**. Cada sistema mide MP1, MP2.5, MP10, NO_2, así como NO, CO, O_3. Esta cotización incluye una suscripción a QuantAQ Cloud por el primer año del proyecto. El costo de cada equipo es de USD 4500 más USD 300 por la suscripción. Incluyendo los fletes, el proyecto tendría un costo de USD 723.000. La empresa también ofrece la posibilidad de incluir módulos de paneles solares por un costo adicional de USD 495.

AQMesh entregó tres opciones, todas por un período de 5 años, considerando mantenciones y de los sensores y OPC en el año 3 y año 5. La primera opción es sólo considerando MP y NO_2, la segunda NOx (NO y NO_2) y MP y la tercera igual que la anterior, pero sumando O3. El costo del primer año es de USD 5.235,64 por equipo.

Clarity cotizó por un piloto de 2 unidades de monitoreo de MP 2.5 y NO2, incluyendo un dispositivo Node-S que mide MP2.5 + NO2. Cuenta con panel solar incluido por defecto. El costo es de USD 2.520 más costos de envío. Debido a que los dispositivos ofrecidos por Clarity no realizan todas las mediciones que las otras opciones estudiadas sí incluyen, es difícil hacer una comparación concreta en esta etapa.

Todas las cotizaciones son válidas entre 30 a 60 días a contar de la emisión de este informe, por lo que los valores pueden variar después de estos plazos.

Cabe mencionar que la mayoría de los fabricantes sugieren incluir los paneles solares, dado que evitan los problemas asociados a la instalación y conexión eléctrica, dándoles autonomía de la red eléctrica y no perdiendo el estándar IP 67 de la carcasa.

Los costos de adquisición más el valor de la operación del primer año (considerando las economías de escala de adquirir 150 equipos) está resumido en la siguiente tabla. Los valores se encuentran en pesos chilenos (CLP). Para los cálculos se utilizó un tipo de cambio de 1 USD = 1.000 CLP.

Oferente	Consideraciones	Total sin IVA (CLP)
Clarity	MP2.5 + NO2	$1.855.000
Kunak	MP1, MP2.5, MP10, PTS y NO2	$3.630.792
QuantAQ	M1, MP2.5, MP10, NO2, NO, CO, O3	$4.823.333
AQMesh	NO2 + MP	$5.236.250

Tabla 5: Costos de adquisición más valores de operación del primer año para los proveedores estudiados.

Oferente	Nivel 1 - 50 puntos	Nivel 2 - 100 puntos	Nivel 3 - 150 puntos
Clarity	$92.750.000	$185.500.000	$278.250.000
Kunak	$181.539.600	$363.079.200	$544.618.800
QuantAQ	$241.166.667	$482.333.333	$723.500.000
AQMesh	$261.812.500	$523.625.000	$785.437.500

Tabla 6: Costo de adquisición para completar niveles 1, 2 y 3 (CLP sin IVA)

6.1.2 Costos por Componentes Individuales

a) Costos de Hardware

Los sensores de NOx se cotizaron con la empresa Alphasense Ametek. Estos entregaron los costos considerando los sensores de NO y NO_2, el board y el kit de instalación.

Para la medición de partículas, se tomó en consideración una compra realizada en AliExpress, al igual que el contador de vehículos Jetson Nano.

b) Costos de Instalación

La empresa Antü Energía indica que la instalación de la caja debiese estar alrededor de CLP 20.000 por equipo. En cambio, la instalación eléctrica CLP 5.000. Cabe mencionar que no están considerados los materiales eléctricos.

c) Costos de Comunicaciones

La empresa Entel entrega tarjetas SIM gratis y los planes empresa de comunicaciones celulares globales multibanda LTE (2G-3G-4G) van desde CLP 9.197 (60 GB) a CLP 19.356 (280 MB) mensuales.

d) Costos de Mantención

La empresa AQMesh estima mantenciones cada 2 años de operación, con un costo de USD 872 cada una, lo que aproximadamente se estimaría en unos CLP 900.000 por equipo. Sin embargo, la empresa Sercoamb (Kunak) lo estima en CLP 150.000 anual. Al ser un proveedor local, se considerará ese valor.

e) Factores de Corrección

Al costo total se le ha asignado un factor de corrección de 1.5. La justificación corresponde a tres factores que pueden variar: primero, y como se señaló, las cotizaciones tienen una validez limitada dependiendo el proveedor, la cual va desde 30 a 60 días desde que son emitidas, por lo que no se puede asegurar que el precio se mantenga en el tiempo. Segundo, los valores varían directamente por el valor del tipo de cambio y, por último, se considera un margen de seguridad por imprevistos.

f) Cálculos Finales

Costos unitarios CLP sin IVA	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Sensores NOx	$373.300	$-	$373.300	$-	$373.300
Sensor MP 2.5	$80.000	$-	$80.000	$-	$80.000
Carcasa IP65	$10.000	$-	$-	$-	$-
Cables y otros materiales eléctricos	$10.000	$-	$-	$-	$-
Total Hardware	**$473.300**	**$-**	**$453.300**	**$-**	**$453.300**
Instalación	$20.000	$-	$-	$-	$-
Conexión eléctrica	$50.000	$-	$-	$-	$-
Total Instalación	**$70.000**	**$-**	**$-**	**$-**	**$-**
Comunicación celular multibanda LTE (2G-3G-4G)	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**
Mantenciones (cada 2 años)	**$-**	**$-**	**$150.000**	**$-**	**$150.000**

Total CLP sin IVA	**$783.300**	**$240.000**	**$843.300**	**$240.000**	**$843.300**
Factor de corrección	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Total final	**$1.174.950**	**$360.000**	**$1.264.950**	**$360.000**	**$1.264.950**

Total operación 5 años	**$4.424.850**

Tabla 7: Costos asociados al montaje de los sensores por componentes individuales.

Costos para 3 niveles de red CLP sin IVA	**1 año**	**5 años**
Nivel 1 - 50 puntos	$58.747.500	$221.242.500
Nivel 2 - 100 puntos	$117.495.000	$442.485.000
Nivel 3 - 150 puntos	$176.242.500	$663.727.500

Tabla 8: Costos del contador de vehículos dentro de un horizonte de evaluación de 5 años.

6.2 Costos Contador de Vehículos

Adicionalmente a los sistemas de calidad de aire integrados, es necesario agregar el contador de vehículos. Los costos se indican a continuación.

Costos unitarios CLP sin IVA	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Contador de vehículos (Jetson Nano)	$155.000	$-	$155.000	$-	$155.000
Carcasa IP65	$10.000	$-	$-	$-	$-
Cables y otros materiales eléctricos	$10.000	$-	$-	$-	$-
Total Hardware	**$175.000**	**$-**	**$155.000**	**$-**	**$155.000**
Instalación	$20.000	$-	$-	$-	$-
Conexión eléctrica	$50.000	$-	$-	$-	$-
Total Instalación	**$70.000**	**$-**	**$-**	**$-**	**$-**
Comunicación celular multibanda LTE (2G-3G-4G)	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**
Mantenciones (cada 2 años)	**$-**	**$-**	**$150.000**	**$-**	**$150.000**

Total CLP sin IVA	**$485.000**	**$240.000**	**$545.000**	**$240.000**	**$545.000**
Factor de corrección	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Total final	**$727.500**	**$360.000**	**$817.500**	**$360.000**	**$817.500**

Total operación 5 años	**$3.082.500**

Tabla 9: Costos asociados al contador de vehículos.

Costos para 3 niveles de red CLP sin IVA	1 año	5 años
Nivel 1 - 50 puntos	$36.375.000	$154.125.000
Nivel 2 - 100 puntos	$72.750.000	$308.250.000
Nivel 3 - 150 puntos	$109.125.000	$462.375.000

Tabla 10: Costos del contador de vehículos dentro de un horizonte de evaluación de 5 años.

6.3 Sistemas de Calidad de Aire y Contador de Vehículos

En esta sección se presentan los costos de las siguientes opciones:

- Sistema de calidad de aire "llave en mano" sumado al sistema de conteo de vehículos.
- Sistema de calidad de aire por componentes individuales sumado al sistema de conteo de vehículos.

a) Sistema de calidad de aire "llave en mano" sumado al sistema de conteo de vehículos, considerando un periodo de 1 año.

Nivel 1 - 50 puntos

Sensores llave en mano		Costo contador	Total
Clarity	$92.750.000	$36.375.000	**$129.125.000**
Kunak	$181.539.600	$36.375.000	**$217.914.600**
QuantAQ	$241.166.667	$36.375.000	**$277.541.667**
AQMesh	$261.812.500	$36.375.000	**$298.187.500**

Nivel 2 - 100 puntos

Sensores llave en mano		Costo contador	Total
Clarity	$185.500.000	$72.750.000	**$258.250.000**
Kunak	$363.079.200	$72.750.000	**$435.829.200**
QuantAQ	$482.333.333	$72.750.000	**$555.083.333**
AQMesh	$523.625.000	$72.750.000	**$596.375.000**

Nivel 3 - 150 puntos

Sensores llave en mano		Costo contador	Total
Clarity	$278.250.000	$109.125.000	**$387.375.000**
Kunak	$544.618.800	$109.125.000	**$653.743.800**
QuantAQ	$723.500.000	$109.125.000	**$832.625.000**
AQMesh	$785.437.500	$109.125.000	**$894.562.500**

Tabla 11: Costo de adquisición para completar niveles 1, 2 y 3 (CLP sin IVA)

b) Sistema de calidad de aire por componentes individuales sumado al sistema de conteo de vehículos

Tomando en consideración la información entregada en las secciones anteriores, se determinan los costos de la implementación local para un punto completo de medición: MP2.5, NOx, conteo de vehículos.

La suma del costo de los sensores de NOx, sensor de MP2.5 y el contador de vehículos, considerando la carcasa y los materiales eléctricos como costo de inversión; más la instalación y conexión eléctrica y la comunicación celular, da un costo individual luego de la corrección de CLP $1.407.450 para la operación del primer año. El costo total del funcionamiento por un periodo de 5 años, al ser incluidas las mantenciones y el plan de datos, da un costo total de CLP 5.122.350 (los valores indicados no incluyen IVA).

Esta opción tiene economías de escala en el hardware, pues la caja IP65 y los materiales eléctricos serían compartidos. Así mismo, los costos de instalación y de comunicación, con lo que se lograría un ahorro importante al integrar los sensores y el contador en un solo dispositivo armado a través de componentes individuales.

Costos unitarios CLP sin IVA	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Sensores NOx	$373.300	$-	$373.300	$-	$373.300
Sensor MP 2.5	$80.000	$-	$80.000	$-	$80.000
Contador de vehículos (Jetson Nano)	$155.000	$-	$155.000	$-	$155.000
Carcasa IP65	$10.000	$-	$-	$-	$-
Cables y otros materiales eléctricos	$10.000	$-	$-	$-	$-
Total Hardware	**$628.300**	$-	**$608.300**	$-	**$608.300**
Instalación	$20.000	$-	$-	$-	$-
Conexión eléctrica	$50.000	$-	$-	$-	$-
Total Instalación	**$70.000**	$-	**$-**	$-	**$-**
Comunicación celular multibanda LTE (2G-3G-4G)	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**	**$240.000**
Mantenciones (cada 2 años)	**$-**	**$-**	**$150.000**	**$-**	**$150.000**
Total	**$938.300**	**$240.000**	**$998.300**	**$240.000**	**$998.300**
Factor de corrección	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Total final	**$1.407.450**	**$360.000**	**$1.497.450**	**$360.000**	**$1.497.450**

Tabla 12: Costos del sistema de calidad de aire por componentes sumado al sistema de conteo de vehículos.

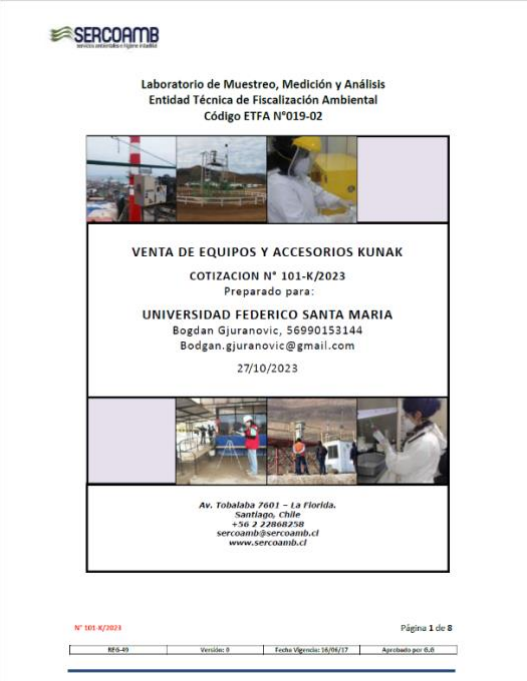
Considerado un horizonte de evaluación de 5 años y los niveles de red se obtiene lo siguiente:

Costos para 3 niveles de red	**1 año**	**5 años**
Nivel 1 - 50 puntos	$70.372.500	$256.117.500
Nivel 2 - 100 puntos	$140.745.000	$512.235.000
Nivel 3 - 150 puntos	$211.117.500	$768.352.500

Tabla 13: Costos del sistema de calidad de aire por componentes sumado al sistema de conteo de vehículos, considerado niveles de red 1, 2 y 3 (CLP sin IVA)

6.4 Anexos Estimación de Costos

6.4.1 Anexo 1: Cotización Kunak



SERCOAMB

Laboratorio de Muestreo, Medición y Análisis
Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental
Código ETFA N°019-02

VENTA DE EQUIPOS Y ACCESORIOS KUNAK

COTIZACION N° 101-K/2023
Preparado para:

UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARIA
Bogdan Gjuranovic, 56990153144
Bodgan.gjuranovic@gmail.com

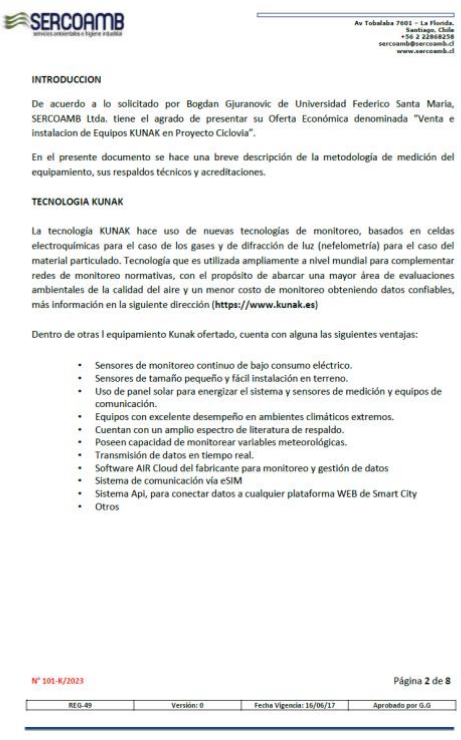
27/10/2023

Av. Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago, Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

N° 101-K/2023 Página 1 de 8

REG-49	Versión: 0	Fecha Vigencia: 16/06/17	Aprobado por G.G

Figura 27: Cotización Kunak página 1 de 8.



SERCOAMB

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago, Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

INTRODUCCION

De acuerdo a lo solicitado por Bogdan Gjuranovic de Universidad Federico Santa Maria, SERCOAMB Ltda. tiene el agrado de presentar su Oferta Económica denominada "Venta e instalacion de Equipos KUNAK en Proyecto Ciclovia".

En el presente documento se hace una breve descripción de la metodología de medición del equipamiento, sus respaldos técnicos y acreditaciones.

TECNOLOGIA KUNAK

La tecnología KUNAK hace uso de nuevas tecnologías de monitoreo, basados en celdas electroquímicas para el caso de los gases y de difracción de luz (nefelometría) para el caso del material particulado. Tecnología que es utilizada ampliamente a nivel mundial para complementar redes de monitoreo normativas, con el propósito de abarcar una mayor área de evaluaciones ambientales de la calidad del aire y un menor costo de monitoreo obteniendo datos confiables, más información en la siguiente dirección (**https://www.kunak.es**)

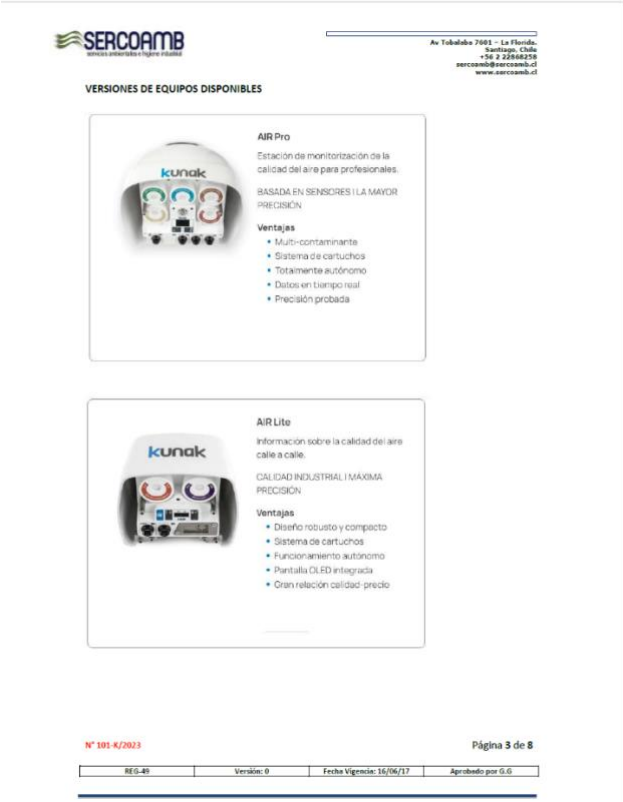
Dentro de otras l equipamiento Kunak ofertado, cuenta con alguna las siguientes ventajas:

- Sensores de monitoreo continuo de bajo consumo eléctrico.
- Sensores de tamaño pequeño y fácil instalación en terreno.
- Uso de panel solar para energizar el sistema y sensores de medición y equipos de comunicación.
- Equipos con excelente desempeño en ambientes climáticos extremos.
- Cuentan con un amplio espectro de literatura de respaldo.
- Poseen capacidad de monitorear variables meteorológicas.
- Transmisión de datos en tiempo real.
- Software AIR Cloud del fabricante para monitoreo y gestión de datos
- Sistema de comunicación vía eSIM
- Sistema Api, para conectar datos a cualquier plataforma WEB de Smart City
- Otros

N° 101-K/2023 Página 2 de 8

REG-49	Versión: 0	Fecha Vigencia: 16/06/17	Aprobado por G.G

Figura 28: Cotización Kunak página 2 de 8.



SERCOAMB
servicios ambientales e higiene industrial

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago. Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

VERSIONES DE EQUIPOS DISPONIBLES

AIR Pro

Estación de monitorización de la calidad del aire para profesionales.

BASADA EN SENSORES I LA MAYOR PRECISIÓN

Ventajas

- Multi-contaminante
- Sistema de cartuchos
- Totalmente autónomo
- Datos en tiempo real
- Precisión probada

AIR Lite

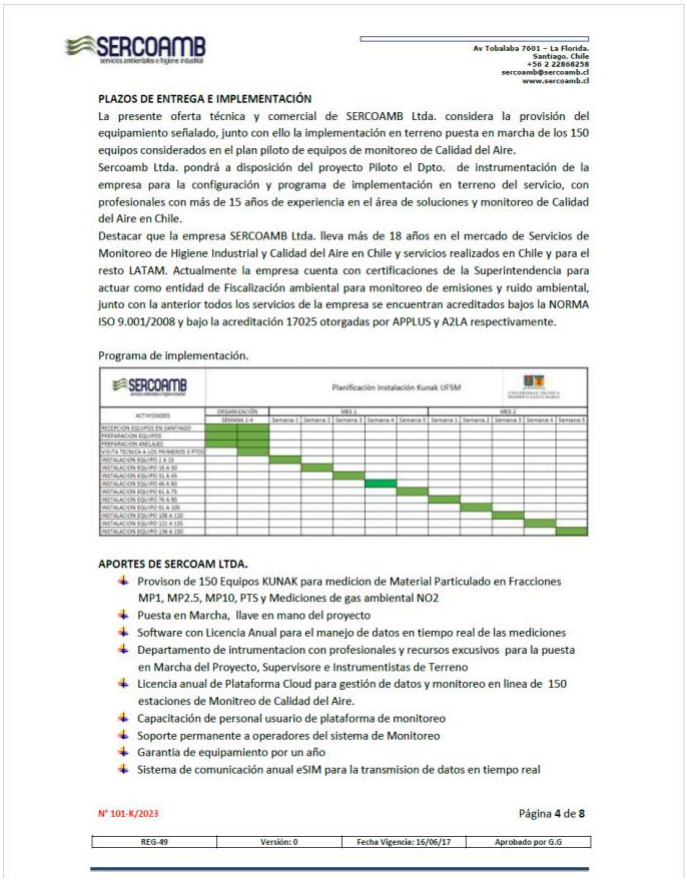
Información sobre la calidad del aire calle a calle.

CALIDAD INDUSTRIAL I MÁXIMA PRECISIÓN

Ventajas

- Diseño robusto y compacto
- Sistema de cartuchos
- Funcionamiento autónomo
- Pantalla OLED integrada
- Gran relación calidad-precio

Figura 29: Cotización Kunak página 3 de 8.



SERCOAMB
servicios ambientales e higiene industrial

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago. Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

PLAZOS DE ENTREGA E IMPLEMENTACIÓN

La presente oferta técnica y comercial de SERCOAMB Ltda. considera la provisión del equipamiento señalado, junto con ello la implementación en terreno puesta en marcha de los 150 equipos considerados en el plan piloto de equipos de monitoreo de Calidad del Aire.

Sercoamb Ltda. pondrá a disposición del proyecto Piloto el Dpto. de instrumentación de la empresa para la configuración y programa de implementación en terreno del servicio, con profesionales con más de 15 años de experiencia en el área de soluciones y monitoreo de Calidad del Aire en Chile.

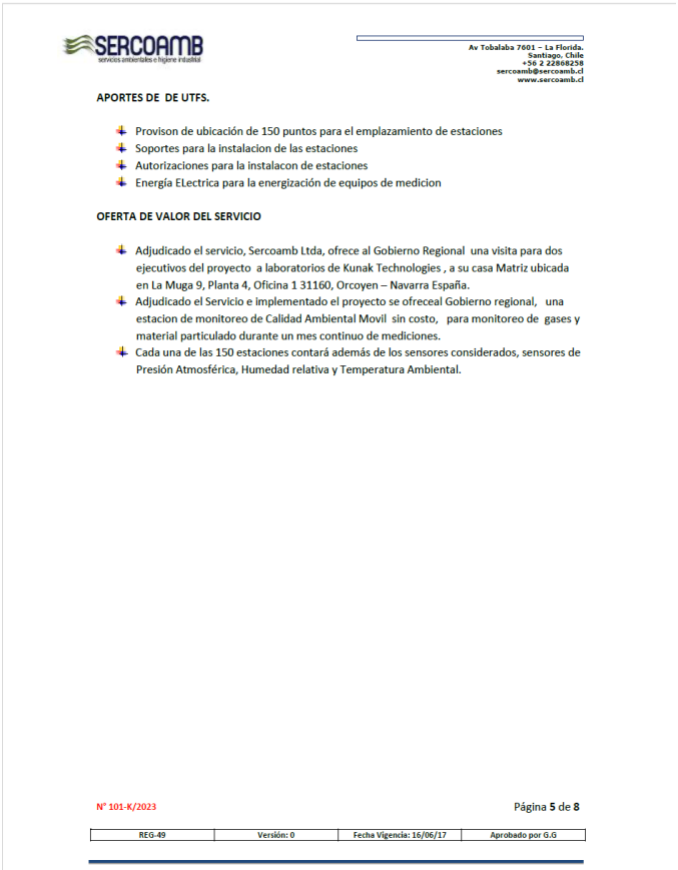
Destacar que la empresa SERCOAMB Ltda. lleva más de 18 años en el mercado de Servicios de Monitoreo de Higiene Industrial y Calidad del Aire en Chile y servicios realizados en Chile y para el resto LATAM. Actualmente la empresa cuenta con certificaciones de la Superintendencia para actuar como entidad de Fiscalización ambiental para monitoreo de emisiones y ruido ambiental, junto con la anterior todos los servicios de la empresa se encuentran acreditados bajos la NORMA ISO 9.001/2008 y bajo la acreditación 17025 otorgadas por APPLUS y A2LA respectivamente.

Programa de implementación.

APORTES DE SERCOAM LTDA.

- Provison de 150 Equipos KUNAK para medicion de Material Particulado en Fracciones MP1, MP2.5, MP10, PTS y Mediciones de gas ambiental NO2
- Puesta en Marcha, llave en mano del proyecto
- Software con Licencia Anual para el manejo de datos en tiempo real de las mediciones
- Departamento de intrumentacion con profesionales y recursos excusivos para la puesta en Marcha del Proyecto, Supervisore e Instrumentistas de Terreno
- Licencia anual de Plataforma Cloud para gestión de datos y monitoreo en linea de 150 estaciones de Monitreo de Calidad del Aire.
- Capacitación de personal usuario de plataforma de monitoreo
- Soporte permanente a operadores del sistema de Monitoreo
- Garantia de equipamiento por un año
- Sistema de comunicación anual eSIM para la transmision de datos en tiempo real

Figura 30: Cotización Kunak página 4 de 8.



SERCOAMB
servicios ambientales e higiene industrial

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago, Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

APORTES DE DE UTFS.

- Provison de ubicación de 150 puntos para el emplazamiento de estaciones
- Soportes para la instalacion de las estaciones
- Autorizaciones para la instalacon de estaciones
- Energía ELectrica para la energización de equipos de medicion

OFERTA DE VALOR DEL SERVICIO

- Adjudicado el servicio, Sercoamb Ltda, ofrece al Gobierno Regional una visita para dos ejecutivos del proyecto a laboratorios de Kunak Technologies , a su casa Matriz ubicada en La Muga 9, Planta 4, Oficina 1 31160, Orcoyen – Navarra España.
- Adjudicado el Servicio e implementado el proyecto se ofreceal Gobierno regional, una estacion de monitoreo de Calidad Ambiental Movil sin costo, para monitoreo de gases y material particulado durante un mes continuo de mediciones.
- Cada una de las 150 estaciones contará además de los sensores considerados, sensores de Presión Atmosférica, Humedad relativa y Temperatura Ambiental.

Figura 31: Cotización Kunak página 5 de 8.

SERCOAMB
servicios ambientales e higiene industrial

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago, Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

OFERTA ECONOMICA

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO ($)	VALOR UNITARIO ($)
KUNAK AIR LITE	150	3.630.792	544.618.750

Nota 1: Valores se le debe agregar IVA
Nota 2: Los valores consideran la instalación y capacitacion de los equipos, la instalacion se definira en el lugar geográfico establecido para el proyecto.
Nota 3: Descripción técnica de los equipos a adquirir, ver ANEXO1
Nota 4: Plazo entrega entre 6 y 8 semanas recibida OC

Condiciones de Pago

La condición de pago para los servicios de la presente cotización será:
50% anticipado
50% contra entrega de equipos Funcionando

Validez de la Propuesta

La presente cotización tendrá vigencia de 60 días.

En caso de estar de acuerdo con la propuesta económica presentada, agradecemos notificar mediante emisión de Orden de Compra o aceptación de esta cotización mediante correo electrónico.

Figura 32: Cotización Kunak página 6 de 8.

SERCOAMB
servicios ambientales e higiene industrial

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago. Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

ANEXO1

Codigo	Descripcion	Cantidad
K-B3-14-1	ESTACIÓN BASE KUNAK AIR LITE INALAMBRICA Estación basada en sesores para la monitorización de la Calidad del Aire y otros Parámetros Ambientales. La estación base incluye: - Comunicaciones celulares globales multibanda LTE (2G-3G-4G). Soporte para tarjeta SIM y eSIM integrados. - Hasta 2 tomas para instalar cartuchos de gas inteligentes Kunak para medir concentraciones de gas. - 1 compartimento para el sensor de partículas. - Sensores integrados de temperatura, presión y humedad relativa. - 1 entrada para sondas ambientales (Anemómetro + Pluviómetro) - GNSS (GPS-Glonass-Beidou). - Carcasa resistente IP65 para instalación en exteriores. - Kit de instalación del dispositivo que incluye 1 soporte para poste/ pared, 1 kit de abrazadera de metálicas y herramienta de montaje. Batería no incluida.	150
K-NO2-A-01	CARTUCHO DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO2). RANGO 0-5.000 ppb	150
K-AL-PM-A-01	SENSOR DE PARTÍCULAS AIR LITE PM1.0, PM2.5, PM10*. RANGO 0-1,000 µg/m3 (TIPO B)	150
K-PW-12VIP65-1C-01	PACK DE ALIMENTACIÓN AIR PRO/LITE IP65 (batería de 1 celda): - Fuente de alimentación exterior de 12V IP65. - Batería interna de litio recargable de alta potencia (10Wh).	150
K-C2-ORG-C	CUENTA DE USUARIO: ADMIN (Obligatoria) Cuenta de software para clientes finales; gestiona los dispositivos y a las cuentas de usuario adicional; cuota anual.	1
K-C2-DEV-SP	PAQUETE INICIAL - Diagnóstico: Descripción general del estado de la red, verificación de los registros y los diagnósticos automáticos las 24 horas del día, los 7 días de la semana. Herramienta de preinvalidación automática. - Visualización: Dashboard, mapa, gráficos multidispositivo, tablas, estadísticas y CSV. Herramientas y cálculos AQI.	150

Figura 33: Cotización Kunak página 7 de 8.

SERCOAMB
servicios ambientales e higiene industrial

Av Tobalaba 7601 – La Florida.
Santiago. Chile
+56 2 22868258
sercoamb@sercoamb.cl
www.sercoamb.cl

Tipo Documento Contable

Factura afecta a IVA

Datos del Proveedor

Nombre Empresa	:	SERCOAMB LTDA.
RUT	:	76.128.400-2
Giro	:	Servicios Ambientales e Higiene Ocupacional
Dirección	:	Avda. Tobalaba 7601 – La Florida
Contacto	:	José González Cantillana
Mail Contacto	:	jgonzalez@sercoamb.cl, sercoamb@sercoamb.cl
Teléfono	:	224028657 - 966467437

Datos Bancarios

Banco	:	ITAU
Tipo Cuenta	:	Cuenta Corriente
Número Cuenta	:	223807421
Nombre Titular Cuenta	:	SERCOAMB
RUT Titular Cuenta	:	76.128.400-2
Mail Confirmación Pago	:	sercoamb@sercoamb.cl, Fbettiz@sercoamb.cl

Figura 34: Cotización Kunak página 8 de 8.

6.4.2 Anexo 2: Cotización QuantAQ

QUOTE

Valid until Nov 26, 2023

$723,500.00

QuantAQ, Inc.
444 Somerville Avenue
Somerville, Massachusetts 02143
United States
+1 617-798-2923
sales@quant-aq.com
US EIN 84-2021240

QUOTE NUMBER QT-2E7945FC-0001-1
ISSUE DATE Oct 27, 2023
EXPIRATION DATE Nov 26, 2023

QUOTE FOR
Universidad Santa Maria
Av. Vicuña Mackenna 3939
San Joaquín
8940897 San Joaquín
Región Metropolitana
Chile
+56990153144
bogdan.gjuranovic@gmail.com

SHIP TO
Universidad Santa Maria
Av. Vicuña Mackenna 3939
San Joaquín
8940897 San Joaquín
Región Metropolitana
Chile
+56990153144

Incoterm CIF

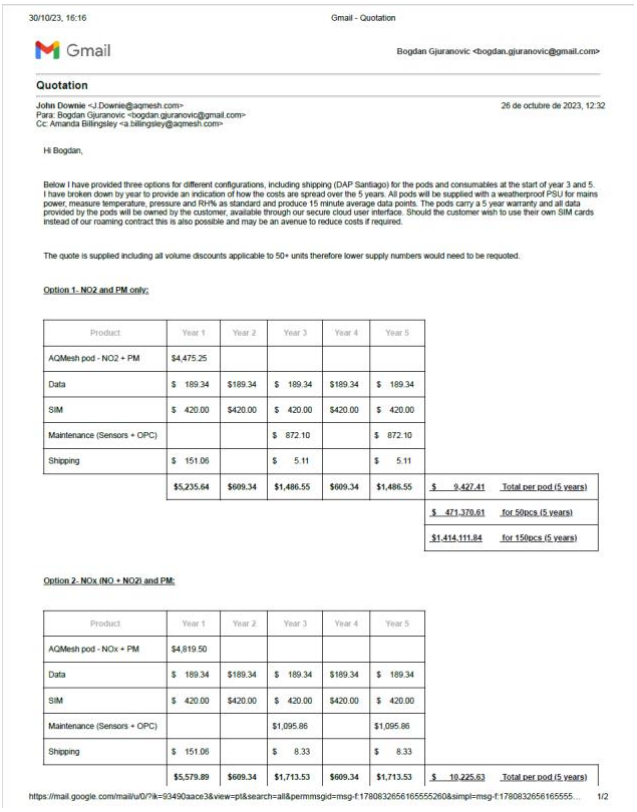
DESCRIPTION	QTY	UNIT PRICE	AMOUNT
MOD-015-Global IoT Particulate Matter and Gas Analyzer provides real-time data for PM1, PM2.5, and PM10 (0-2,000 µg/m3), CO, NO, NO2, O3, relative humidity, and temperature. Configured for deployments in Europe and Oceana.	150	$4,500.00	$675,000.00
QuantAQ Cloud (Basic) (per unit per yr) The QuantAQ Cloud provides multi-user access to the data platform, real-time visualization of data, data management, storage, and download, API access, and cellular data services on a single-device basis.	150	$300.00	$45,000.00
Shipping and Handling Shipping and Handling Charges.	1	$3,500.00	$3,500.00
	Subtotal		$723,500.00
	Total		$723,500.00

Hardware warranty: 1-year parts and services. Payment: Net 30 days
All taxes, insurance, shipping, duties, and/or fees are the buyer's responsibility.

QT-2E7945FC-0001-1 – Page 1 of 1

Figura 35: Cotización QuantAQ.

6.4.3 Anexo 3: Cotización AQMesh



30/10/23, 16:16 Gmail - Quotation

Gmail Bogdan Gjuranovic <bogdan.gjuranovic@gmail.com>

Quotation

John Downie <J.Downie@aqmesh.com> 26 de octubre de 2023, 12:32
Para: Bogdan Gjuranovic <bogdan.gjuranovic@gmail.com>
Cc: Amanda Billingsley <a.billingsley@aqmesh.com>

Hi Bogdan,

Below I have provided three options for different configurations, including shipping (DAP Santiago) for the pods and consumables at the start of year 3 and 5. I have broken down by year to provide an indication of how the costs are spread over the 5 years. All pods will be supplied with a weatherproof PSU for mains power, measure temperature, pressure and RH% as standard and produce 15 minute average data points. The pods carry a 5 year warranty and all data provided by the pods will be owned by the customer, available through our secure cloud user interface. Should the customer wish to use their own SIM cards instead of our roaming contract this is also possible and may be an avenue to reduce costs if required.

The quote is supplied including all volume discounts applicable to 50+ units therefore lower supply numbers would need to be requoted.

Option 1- NO2 and PM only:

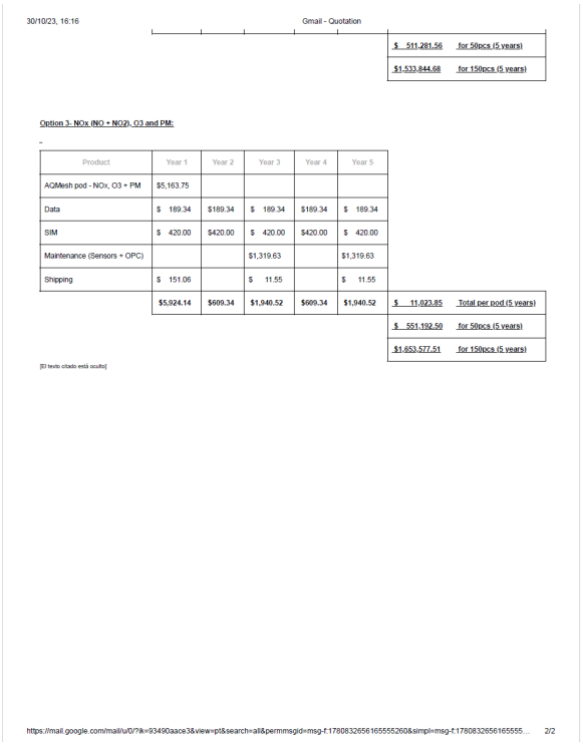
Product	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5		
AQMesh pod - NO2 + PM	$4,475.25						
Data	$ 189.34	$189.34	$ 189.34	$189.34	$ 189.34		
SIM	$ 420.00	$420.00	$ 420.00	$420.00	$ 420.00		
Maintenance (Sensors + OPC)			$ 872.10		$ 872.10		
Shipping	$ 151.06		$ 5.11		$ 5.11		
	$5,235.64	**$609.34**	**$1,486.55**	**$609.34**	**$1,486.55**	$ 9,427.41	Total per pod (5 years)
						$ 471,370.61	for 50pcs (5 years)
						$1,414,111.84	for 150pcs (5 years)

Option 2- NOx (NO + NO2) and PM:

Product	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5		
AQMesh pod - NOx + PM	$4,819.50						
Data	$ 189.34	$189.34	$ 189.34	$189.34	$ 189.34		
SIM	$ 420.00	$420.00	$ 420.00	$420.00	$ 420.00		
Maintenance (Sensors + OPC)			$1,095.86		$1,095.86		
Shipping	$ 151.06		$ 8.33		$ 8.33		
	$5,579.89	**$609.34**	**$1,713.53**	**$609.34**	**$1,713.53**	$ 10,225.63	Total per pod (5 years)

https://mail.google.com/mail/u/0/?ik=93490aace3&view=pt&search=all&permmsgid=msg-f:1780832656165555260&simpl=msg-f:1780832656165555... 1/2

Figura 36: Cotización AQMesh página 1 de 2.



30/10/23, 16:16 Gmail - Quotation

$ 511,281.56	for 50pcs (5 years)	
$1,533,844.68	for 150pcs (5 years)	

Option 3- NOx (NO + NO2), O3 and PM:

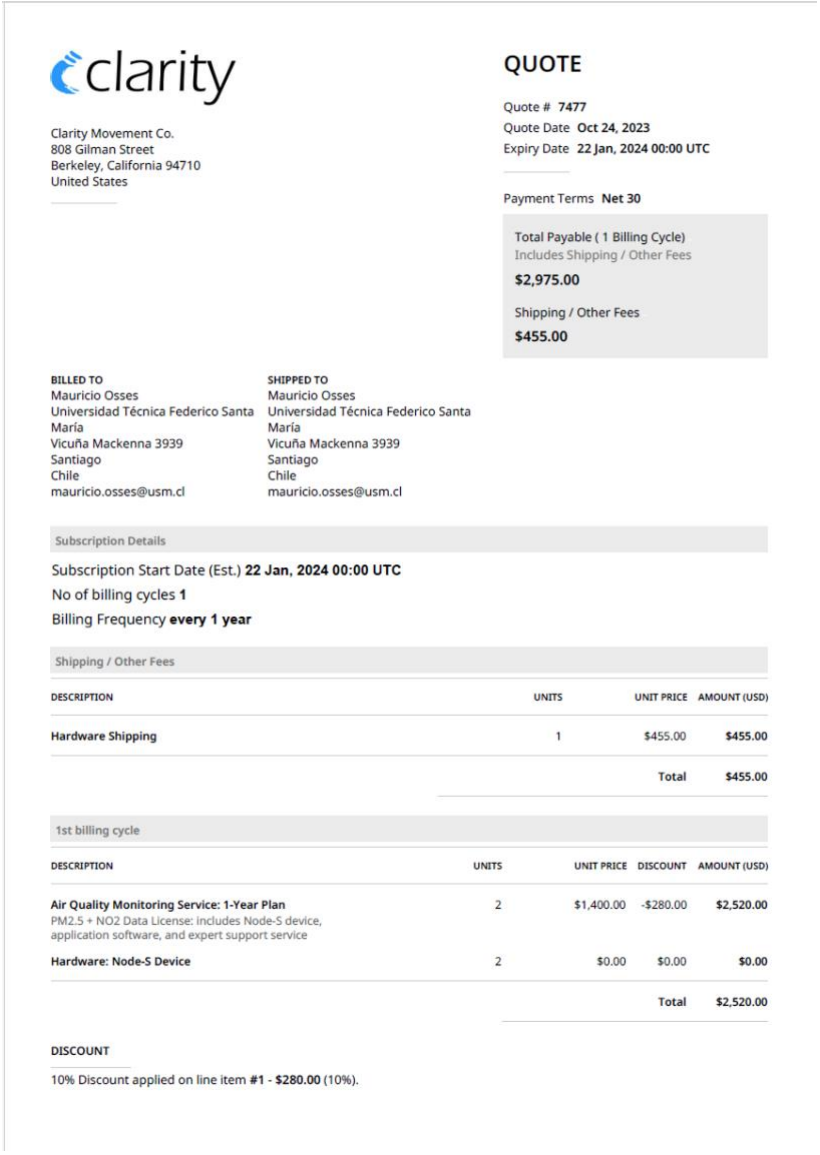
Product	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5		
AQMesh pod - NOx, O3 + PM	$5,163.75						
Data	$ 189.34	$189.34	$ 189.34	$189.34	$ 189.34		
SIM	$ 420.00	$420.00	$ 420.00	$420.00	$ 420.00		
Maintenance (Sensors + OPC)			$1,319.63		$1,319.63		
Shipping	$ 151.06		$ 11.55		$ 11.55		
	$5,924.14	**$609.34**	**$1,940.52**	**$609.34**	**$1,940.52**	$ 11,023.85	Total per pod (5 years)
						$ 551,192.50	for 50pcs (5 years)
						$1,653,577.51	for 150pcs (5 years)

[El texto citado está oculto]

https://mail.google.com/mail/u/0/?ik=93490aace3&view=pt&search=all&permmsgid=msg-f:1780832656165555260&simpl=msg-f:1780832656165555... 2/2

Figura 37: Cotización AQMesh página 2 de 2.

6.4.4 Anexo 4: Cotización Clarity



clarity

Clarity Movement Co.
808 Gilman Street
Berkeley, California 94710
United States

QUOTE

Quote # **7477**
Quote Date **Oct 24, 2023**
Expiry Date **22 Jan, 2024 00:00 UTC**

Payment Terms **Net 30**

Total Payable (1 Billing Cycle)
Includes Shipping / Other Fees
$2,975.00

Shipping / Other Fees
$455.00

BILLED TO
Mauricio Osses
Universidad Técnica Federico Santa María
Vicuña Mackenna 3939
Santiago
Chile
mauricio.osses@usm.cl

SHIPPED TO
Mauricio Osses
Universidad Técnica Federico Santa María
Vicuña Mackenna 3939
Santiago
Chile
mauricio.osses@usm.cl

Subscription Details

Subscription Start Date (Est.) **22 Jan, 2024 00:00 UTC**
No of billing cycles **1**
Billing Frequency **every 1 year**

Shipping / Other Fees

DESCRIPTION	UNITS	UNIT PRICE	AMOUNT (USD)
Hardware Shipping	1	$455.00	**$455.00**
		Total	**$455.00**

1st billing cycle

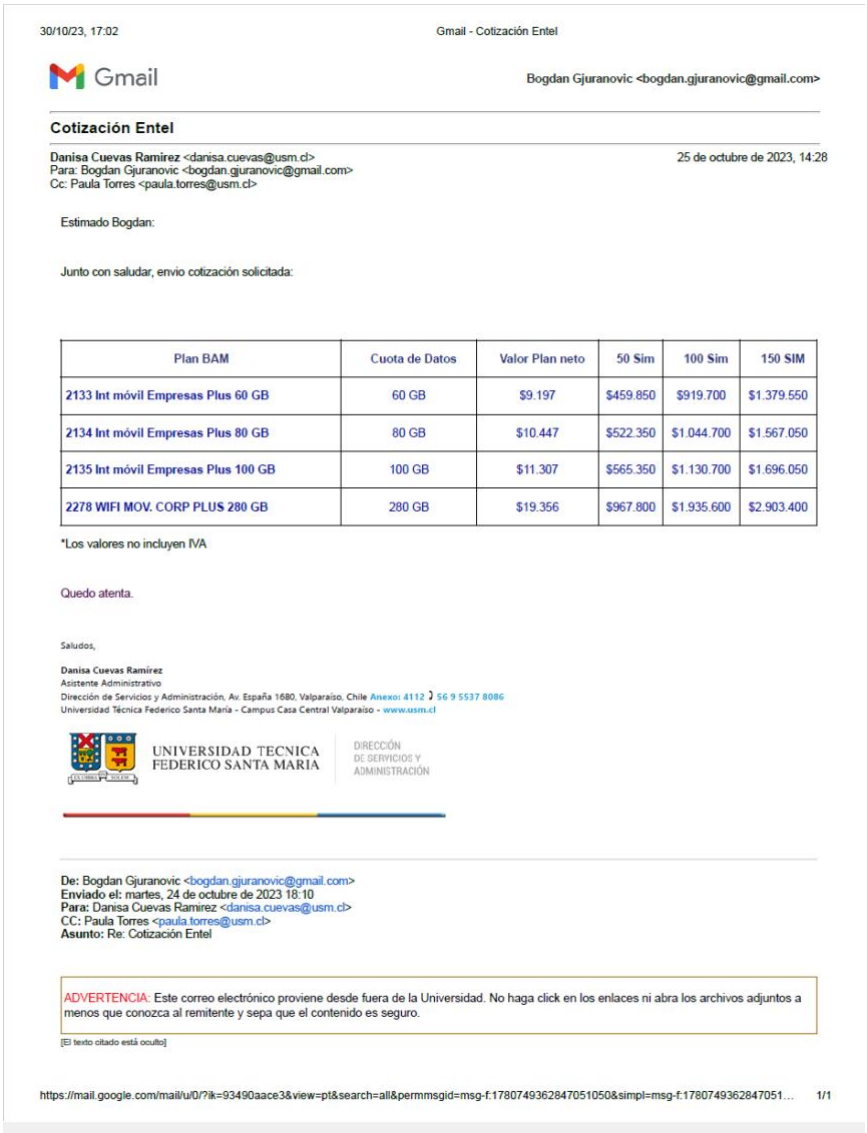
DESCRIPTION	UNITS	UNIT PRICE	DISCOUNT	AMOUNT (USD)
Air Quality Monitoring Service: 1-Year Plan PM2.5 + NO2 Data License: includes Node-S device, application software, and expert support service	2	$1,400.00	-$280.00	**$2,520.00**
Hardware: Node-S Device	2	$0.00	$0.00	**$0.00**
			Total	**$2,520.00**

DISCOUNT

10% Discount applied on line item **#1** - **$280.00** (10%).

Figura 38: Cotización Clarity.

6.4.5 Anexo 5: Cotización Entel



30/10/23, 17:02 Gmail - Cotización Entel

Gmail Bogdan Gjuranovic <bogdan.gjuranovic@gmail.com>

Cotización Entel

Danisa Cuevas Ramírez <danisa.cuevas@usm.cl> 25 de octubre de 2023, 14:28
Para: Bogdan Gjuranovic <bogdan.gjuranovic@gmail.com>
Cc: Paula Torres <paula.torres@usm.cl>

Estimado Bogdan:

Junto con saludar, envio cotización solicitada:

Plan BAM	Cuota de Datos	Valor Plan neto	50 Sim	100 Sim	150 SIM
2133 Int móvil Empresas Plus 60 GB	60 GB	$9.197	$459.850	$919.700	$1.379.550
2134 Int móvil Empresas Plus 80 GB	80 GB	$10.447	$522.350	$1.044.700	$1.567.050
2135 Int móvil Empresas Plus 100 GB	100 GB	$11.307	$565.350	$1.130.700	$1.696.050
2278 WIFI MOV. CORP PLUS 280 GB	280 GB	$19.356	$967.800	$1.935.600	$2.903.400

*Los valores no incluyen IVA

Quedo atenta.

Saludos,

Danisa Cuevas Ramírez
Asistente Administrativo
Dirección de Servicios y Administración, Av. España 1680, Valparaíso, Chile Anexo: 4112) 56 9 5537 8086
Universidad Técnica Federico Santa María - Campus Casa Central Valparaíso - www.usm.cl

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS Y ADMINISTRACIÓN

De: Bogdan Gjuranovic <bogdan.gjuranovic@gmail.com>
Enviado el: martes, 24 de octubre de 2023 18:10
Para: Danisa Cuevas Ramírez <danisa.cuevas@usm.cl>
CC: Paula Torres <paula.torres@usm.cl>
Asunto: Re: Cotización Entel

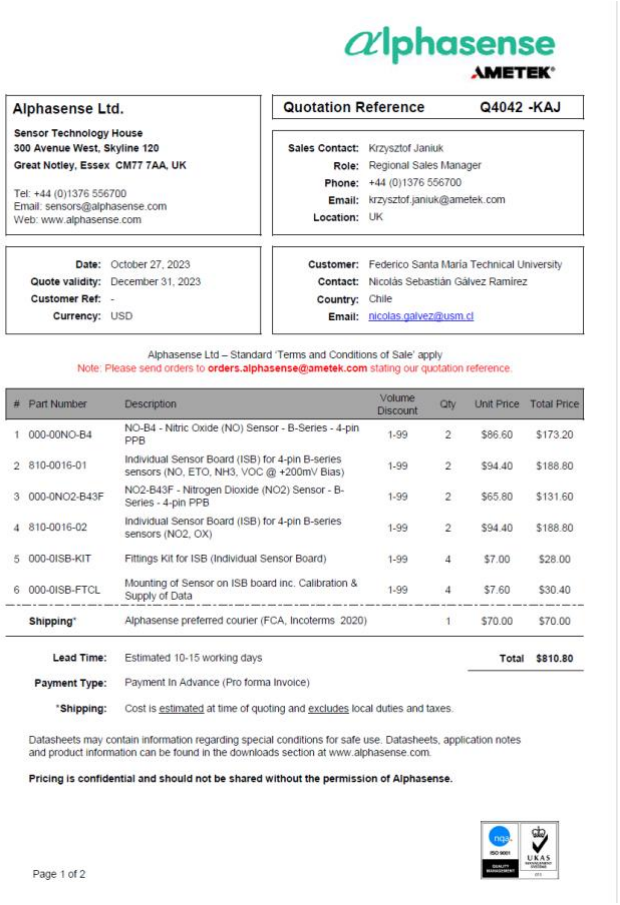
ADVERTENCIA: Este correo electrónico proviene desde fuera de la Universidad. No haga click en los enlaces ni abra los archivos adjuntos a menos que conozca al remitente y sepa que el contenido es seguro.

[El texto citado está oculto]

https://mail.google.com/mail/u/0/?ik=93490aace3&view=pt&search=all&permmsgid=msg-f:1780749362847051050&simpl=msg-f:1780749362847051… 1/1

Figura 39: Cotización Entel.

6.4.6 Anexo 6: Cotización Ametek



alphasense
AMETEK

Alphasense Ltd.
Sensor Technology House
300 Avenue West, Skyline 120
Great Notley, Essex CM77 7AA, UK

Tel: +44 (0)1376 556700
Email: sensors@alphasense.com
Web: www.alphasense.com

Quotation Reference **Q4042 -KAJ**

Sales Contact: Krzysztof Janiuk
Role: Regional Sales Manager
Phone: +44 (0)1376 556700
Email: krzysztof.janiuk@ametek.com
Location: UK

Date: October 27, 2023
Quote validity: December 31, 2023
Customer Ref: -
Currency: USD

Customer: Federico Santa María Technical University
Contact: Nicolás Sebastián Gálvez Ramírez
Country: Chile
Email: nicolas.galvez@usm.cl

Alphasense Ltd – Standard 'Terms and Conditions of Sale' apply
Note: Please send orders to **orders.alphasense@ametek.com** stating our quotation reference.

#	Part Number	Description	Volume Discount	Qty	Unit Price	Total Price
1	000-00NO-B4	NO-B4 - Nitric Oxide (NO) Sensor - B-Series - 4-pin PPB	1-99	2	$86.60	$173.20
2	810-0016-01	Individual Sensor Board (ISB) for 4-pin B-series sensors (NO, ETO, NH3, VOC @ +200mV Bias)	1-99	2	$94.40	$188.80
3	000-0NO2-B43F	NO2-B43F - Nitrogen Dioxide (NO2) Sensor - B-Series - 4-pin PPB	1-99	2	$65.80	$131.60
4	810-0016-02	Individual Sensor Board (ISB) for 4-pin B-series sensors (NO2, OX)	1-99	2	$94.40	$188.80
5	000-0ISB-KIT	Fittings Kit for ISB (Individual Sensor Board)	1-99	4	$7.00	$28.00
6	000-0ISB-FTCL	Mounting of Sensor on ISB board inc. Calibration & Supply of Data	1-99	4	$7.60	$30.40
	Shipping*	Alphasense preferred courier (FCA, Incoterms 2020)		1	$70.00	$70.00

Lead Time: Estimated 10-15 working days **Total** **$810.80**
Payment Type: Payment In Advance (Pro forma Invoice)
***Shipping:** Cost is estimated at time of quoting and excludes local duties and taxes.

Datasheets may contain information regarding special conditions for safe use. Datasheets, application notes and product information can be found in the downloads section at www.alphasense.com.

Pricing is confidential and should not be shared without the permission of Alphasense.

Page 1 of 2

Figura 40: Cotización Ametek.

6.4.7 Anexo 7: Cotización AliExpress

Figura 41: Cotización AliExpress.

7 Referencias

World Meteorological Organization. (2020). *An Update on Low-Cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition.*

Applications of Low-Cost Sensing Technologies for Air Quality Monitoring and Exposure Assessment: How Far Have They Gone? (2018).

Penza, M. (s.f.). *Chapter 12: Low-Cost Sensors for Outdoor Air Quality Monitoring.*

C40 Cities. (2022). *Detectando Cambios.*

Salvatierra, M. Á. (2016). *Exposición de Ciclistas a Material Particulado y Carbono Negro en Santiago.*

Gutiérrez, G. (2023). *Impacto del Diseño de Ciclovías en la Exposición de Usuarios Acontaminantes del Aire con Sensores Portátiles.*

Vargas, D. (2023). *Análisis de Alternativas de Micromovilidad para la Comunidad del Campus San Joaquín de la UTFSM.*

Rodriguez, C. (s.f.). *Radio Pauta*. Obtenido de https://www.pauta.cl/tendencias/2022/01/07/bicicleta-viajes-chile-santiago-transporte-pandemia-popularizado.html

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2021). *Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones*. Obtenido de https://www.mtt.gob.cl/archivos/28458#:~:text=Adem%C3%A1s%2C

Automóvil Club de Chile. (2020). *Covid-19 y Movilidad: Las Cifras que Proyectan el Próximo Escenario.*

Ministerio de Medio Ambiente. (2020). *Encuesta Nacional de Medio Ambiente .*

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (s.f.). *Ciclovías de Chile. Visor Territorial.* Obtenido de https://ciclovias.visorterritorial.cl/

MDPI. (2019). *Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring.*

EPA. (2022). *The Enhanced Air Sensor Guidebook .*

Kiang, L. (2021). *Calibrating Low-Cost Sensors for Ambient Air Monitoring: Tecniques, Trends and Challenges.*

SIT-UOCT. (s.f.). *transporTeinforma*. Obtenido de https://www.transporteinforma.cl/

Prado, G. (2022). *Análisis de la Disposición al Cambio Modal de los Viajes Cortos Mediante la Adopción de la Micromovilidad en el Gran Santiago.*

Gutiérrez, D. (2020). *Análisis de Posibles Nichos de Cambio en el Modo de Transporte de Santiago y sus Repercusiones en las Emisiones de Carbono.*

Departamento de Ingeniería Civil Mecánica Universidad de Chile. (2001). *Actualización del Modelo de Emisiones Vehiculares.*