

Plan de Monitoreo del Aire de la Comunidad: Apéndice D

Iniciativa de Monitoreo Móvil Estatal de California (SMMI)
Sistema de validación y garantía de calidad de la
estimación de la concentración ambiental hiperlocal
(v2.1)



16 de mayo de 2025

Este documento contiene descripciones de propiedad intelectual, metodologías e invenciones cubiertas por patentes estadounidenses e internacionales, o patentes pendientes que

son propiedad exclusiva de Aclima Inc.



La Iniciativa de Monitoreo Móvil Estatal es parte de Inversiones Climáticas de California, una iniciativa estatal que utiliza miles de millones de dólares de Tope y Comercio para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, fortalecer la economía y mejorar la salud pública y el medio ambiente, particularmente en comunidades desfavorecidas.

Tabla de contenido

1.0 Introducción	2
2.0 Preparación de datos	4
2.1 Geolocalización y agregación de datos	4
2.2 Limpieza de datos	5
3.0 Estimaciones de concentración ambiental	6
3.1 Estrategias de modelado	7
3.1.1 Método de mediana normalizada de fondo	7
Descomposición y reconstrucción de señales	7
Modelo de fondo	8
Metodología de intervalos creíbles	8
3.1.2 Método de reconstrucción de medición estadística	9
Descomposición y reconstrucción de señales	9
Cálculo de intervalo creíble	10
3.1.3 Mapeo de métodos de contaminantes	10
4.0 Métricas para la adecuación de la recaudación	11
5.0 Validación de las estimaciones de concentración agregada del segmento	12
5.1 Validación por comparación con mediciones regulatorias	12
5.1.1 Comparación con resolución temporal de las mediciones de sensores móviles con las mediciones reglamentarias	13
5.1.2 Comparación integrada en el tiempo de las estimaciones de concentración ambiental con las mediciones reglamentarias	16
5.2 Contabilización del sesgo de medición sistemática	20
5.3 Validación adicional de las estimaciones de concentración ambiental generadas por el modelo	21
5.3.1 Evaluación mediante escenas de prueba	21
5.3.2 Estrategias de validación autónomas	21
6.0 Referencias	21

1.0 Introducción

Entre los datos útiles que genera la cartografía móvil genera análisis que apoyan la visualización de concentraciones típicas de contaminación con alta resolución espacial (Mapas Hiperlocales) en una región, ciudad o comunidad específica. Estos mapas resaltan las concentraciones típicas durante un período de medición definido, ilustrando las

concentraciones altas y bajas de contaminación a nivel de calle. Estos mapas son solo uno de los muchos productos de datos que se pueden generar a partir del mapeo móvil representa un producto de datos fundamental que cubre una brecha crítica en la comprensión de la distribución espacial de la contaminación. Aclima utiliza datos verificados de 1 Hz para generar estimaciones de concentración en escalas de longitud de agregación deseadas y prácticas (por ejemplo, hexbins o segmentos de carretera) que muestran áreas con niveles persistentemente altos o bajos de contaminantes individuales, lo que respalda la identificación de áreas de impacto desproporcionado.

Alima's Objetivos de calidad de datos para la creación de Los mapas de estimaciones de concentración ambiental son los siguientes:

- Elaborar estimaciones de concentraciones de contaminación ambiental para el período de monitoreo y el área de monitoreo a partir de las mediciones recopiladas en diferentes momentos del día y a lo largo de la semana y en todas las estaciones para abordar adecuadamente las variaciones estacionales y diurnas en los datos.
- Distribución espacial de datos en toda el área geográfica definida por el usuario.
- Producir estimaciones de concentración en escalas de agregación espacial deseadas y prácticas (por ejemplo, hexbins, segmentos de carretera).
- Incluya una medida de confianza (es decir, un intervalo de confianza) con cada estimación de concentración de contaminación ambiental para que los usuarios puedan comprender la confiabilidad de las estimaciones y evaluar la verdadera diferencia en las concentraciones entre ubicaciones.
- Monitorear y dar seguimiento al desempeño de cada medición de contaminación utilizando indicadores clave de calidad de datos: sesgo, precisión y deriva.

Apoyamos la creación de estimaciones de concentración ambiental para los siguientes contaminantes:

- O₃, NO₂, CO, CO₂, PM_{2.5}, and BC

Las estimaciones de la concentración de contaminación ambiental no se producen hasta que se completa la recopilación de datos y se verifican. Estas estimaciones de concentración se calculan utilizando un modelado basado en datos marco que utiliza todos los datos verificados en esa carretera o en esa zona e incorpora fuentes adicionales de datos que proporcionan información sobre tendencias espaciales regionales generales y tendencias temporales a nivel regional, incluyendo, en algunos casos, mediciones regulatorias de sitios de monitoreo estacionarios. El resultado proporciona la mejor estimación de la concentración promedio de cada contaminante, conservando la variabilidad espacial real a escala hiperlocal, a la vez que considera los sesgos que pueden resultar del muestreo con el método móvil en diferentes momentos y ubicaciones. Esta alta resolución espacial de los datos resultantes de Aclima facilita la identificación de las fuentes de emisiones, así como la información sobre la

variabilidad a nivel de barrio en las concentraciones de contaminación atmosférica, lo que facilita el análisis de disparidades. El método de mapeo móvil no es un método de referencia diseñado para respaldar los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS), cual Se apoyan en una red de monitores de referencia fijos. Por lo tanto, los productos de datos del método móvil no permiten evaluar el cumplimiento de las NAAQS.

Los Objetivos de Calidad de Datos se utilizan para definir las metodologías de muestreo, medición, procesamiento y análisis de datos. Este documento describe el proceso que sigue Aclima desde los datos verificados de 1 Hz hasta...Estimaciones espaciales de alta resolución de la concentración ambiental, incluido cómo probamos datos que podrían no ser válidos para su inclusión en cálculos o visualizaciones, así como nuestros procesos de validación y verificación.

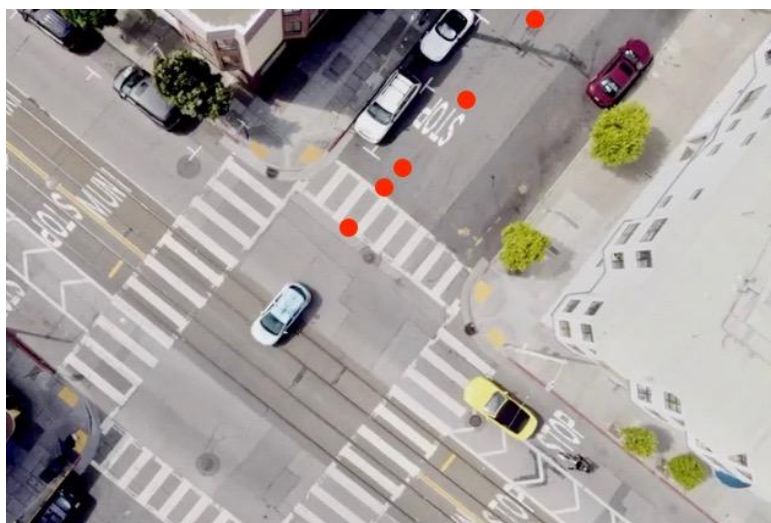
2.0 Preparación de datos

2.1 Geolocalización y agregación de datos

Como los automóviles de Aclima circulan por carreteras de acceso público, sensores dentro del Aclima MNota móvil ("AMN") Muestra con una frecuencia de 1 segundo. Estas mediciones se asocian en la base de datos de Aclima con una hora y ubicación específicas del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de 1 s. La información de posición GPS sin procesar puede, en ocasiones, diferir a varios metros de la carretera por la que circulaba el vehículo debido a la incertidumbre fundamental de la medición GPS, así como a factores externos, como la altura de los edificios, que interfieren con la capacidad del sistema GPS para obtener una ubicación precisa. La posición de los datos GPS sin procesar se corrige para alinearse con la ruta recorrida por el vehículo, a menudo denominada "yendo a la carretera", reduciendo la incertidumbre de la ubicación (Figura 1).

Mediciones de 1 segundo son asignadas a una unidad espacial única (es decir, segmento de carretera, hexbin, etc.) que respalda un objetivo de monitoreo específico basado en la ubicación corregida (latitud y longitud) del punto de datos. Cada unidad individual en esa unidad espacial es definida como un paseo a visitar. Primero, los datos de 1 segundo se agregan en el espacio para calcular la media en la unidad espacial deseada para cada paso a través de esa unidad espacial, normalmente denominada "media de un solo paso". El número de mediciones de 1 s para cada unidad espacial Varía según tamaño (longitud o área), el límite de velocidad de la calle y las condiciones del tráfico durante el recorrido. Esta Agregación espacial permite incluir múltiples puntos de datos en el cálculo de la media de una sola pasada, lo que mejora la estimación del nivel medio de contaminación en esa ubicación. El uso de la media de una sola pasada para...cualquier unidad espacial particular sirve para dar el mismo peso a cada porción geográfica de la unidad, independientemente de cuántos puntos de datos de 1 segundo se hayan recopilado sobre esa unidad espacial El resultado son datos resueltos en el tiempo en la unidad espacial geográfica nivel en lugar de 1 segundo.

La media de los puntos de datos de 1 segundo se verá influenciada por valores atípicos, lo que resultará en un conjunto de medias de un solo paso que admiten un mayor grado de variabilidad debido al muestreo que un conjunto de medianas. Por lo tanto, las estimaciones de incertidumbre resultantes serán más conservadoras que si se hubiera seleccionado una sola mediana.



Cifra 1. Ilustración de puntos de datos de 1 Hz como puntos rojos alineados con la ruta del automóvil.

2.2 Limpieza de datos

Antes de utilizar los datos de 1 segundo para producir estimaciones de concentración ambiental, los datos se marcan utilizando códigos calificadores específicamente definidos para condiciones que, debido a sus condiciones de muestreo o momento, probablemente den como resultado estimaciones sesgadas de las concentraciones ambientales típicas.

Durante la conducción rutinaria, puede haber momentos en los que el vehículo muestre sus propias emisiones de escape, lo que denominamos "autocontaminación". Esta autocontaminación resultará en concentraciones de contaminación medidas superiores a las concentraciones atmosféricas locales para la mayoría de los contaminantes (el ozono estaría sesgado a un nivel inferior) y, por lo tanto, no es representativa de las condiciones atmosféricas reales. La inclusión de datos afectados por la autocontaminación del vehículo sesgará el cálculo de las estimaciones de concentración atmosférica. Tenga en cuenta que utilizamos vehículos híbridos en nuestras flotas que suelen apagar sus motores de gasolina al detenerse, lo que reduce los posibles casos de autocontaminación. Si bien también utilizamos vehículos eléctricos en nuestra flota, que no están sujetos a los mismos problemas de autocontaminación, aplicamos el mismo enfoque en todos los datos recopilados.

Hemos identificado dos condiciones en las que existe potencial de autocontaminación; (1) cuando un vehículo está parado durante un período prolongado de tiempo o (2) viajes repetidos en un corto período de tiempo por la misma sección de carretera. Donde el vehículo puede atravesar su propia columna de humo, como podría ocurrir en una calle sin salida o al dar la vuelta. Si se produce autocontaminación medible como resultado de estas dos condiciones, eliminamos de forma conservadora los segmentos que cumplen cualquiera de estos dos criterios del análisis posterior. Identificamos un vehículo como detenido cuando hay más de 75 segundos de datos en un solo segmento de carretera. El objetivo no es eliminar las situaciones típicas de ralentí que se encuentran en semáforos o señales de stop, sino eliminar una permanencia prolongada en un mismo lugar que puede deberse a que un conductor se detiene por alguna razón. Normalmente encontramos que poco más del 99% de todos los pases toman menos de 75 segundos). En el segundo caso, Aclima elimina fases secuenciales de un segmento dentro de 30 segundos del pase anterior. Se ha capacitado a los conductores para reducir la probabilidad de autocontaminación en estas y otras situaciones.

3.0 Concentración ambiental estimaciones

La contaminación atmosférica presenta una variabilidad significativa en el tiempo y el espacio, lo que implica que la creación de mapas geoespaciales integrados en el tiempo a partir de mediciones con resolución espacial es compleja. Ambos factores deben tenerse en cuenta al diseñar análisis y sistemas basados en datos modelados métodos para producir estimaciones de concentración ambiental.

Las concentraciones de contaminación pueden variar en escalas de tiempo que van desde menos de un minuto hasta meses. La variabilidad en escalas de tiempo cortas, del orden de segundos a minutos, se observa con mayor frecuencia cerca de las fuentes (por ejemplo, la columna de humo de una fuente de combustión), pero también puede reflejar la variabilidad espacial entre barrios o regiones dentro de una ciudad. Las variaciones intradiarias, diarias y anuales en las concentraciones de contaminación pueden resultar de menos incluidos los cambios en los patrones temporales de cuándo ocurren las emisiones, la dinámica atmosférica, los cambios estacionales en el clima y los cambios en las concentraciones regionales causados por la meteorología a escala sinóptica.

La variabilidad espacial de la contaminación del aire a escala de una manzana de la ciudad, entre barrios o entre ciudades surge principalmente de la ubicación y la distancia de las fuentes, los efectos del diseño urbano como los cañones callejeros y las diferencias en el clima a microescala, como las variaciones de temperatura y la velocidad y dirección del viento que surgen de la topología local y regional.

Promedio de alta resolución espacial concentración Las estimaciones se derivan del procesamiento por lotes individual Mediciones (ya sea de 1 segundo o de medias de una sola pasada) en toda el área geográfica de interés y la ventana temporal en la que se realizó el mapeo. El principal desafío en el cálculo de estas estimaciones de alta resolución espacial reside en separar la parte de la señal con resolución temporal en un área de medición que proviene de la variabilidad espacial real de la debida a cambios temporales que pueden ser espacialmente homogéneos, pero muestreados en diferentes momentos y ubicaciones.—Filtrar señales a múltiples escalas temporales y espaciales para separar los cambios regionales de las señales hiperlocales de interés. Los algoritmos de procesamiento de señales también deben gestionar las correlaciones de medición inherentes a cualquier conjunto de observaciones.

Hemos diseñado un marco de estimación para abordar la separación de señales de interés, así como la correlación espacial y temporal empírica en las concentraciones de contaminantes del segmento de carretera, adaptando algoritmos para derivar la mejor estimación del promedio de cada contaminante individual con alta resolución espacial durante el período de tiempo de monitoreo. de Estos modelos Las estrategias requieren una serie de supuestos que requieren validación, lo cual se describe en la Sección 5.

3.1 Estrategias de modelado

El enfoque de modelado general de Aclima para generar estimaciones de contaminación promedio a largo plazo durante el período de monitoreo consiste en la descomposición de la entrada observaciones en tendencias espaciales regionales generales, tendencias temporales regionales y la señal hiperlocal. Estos componentes se recombinan posteriormente para obtener estimaciones promedio con resolución espacial hiperlocal.

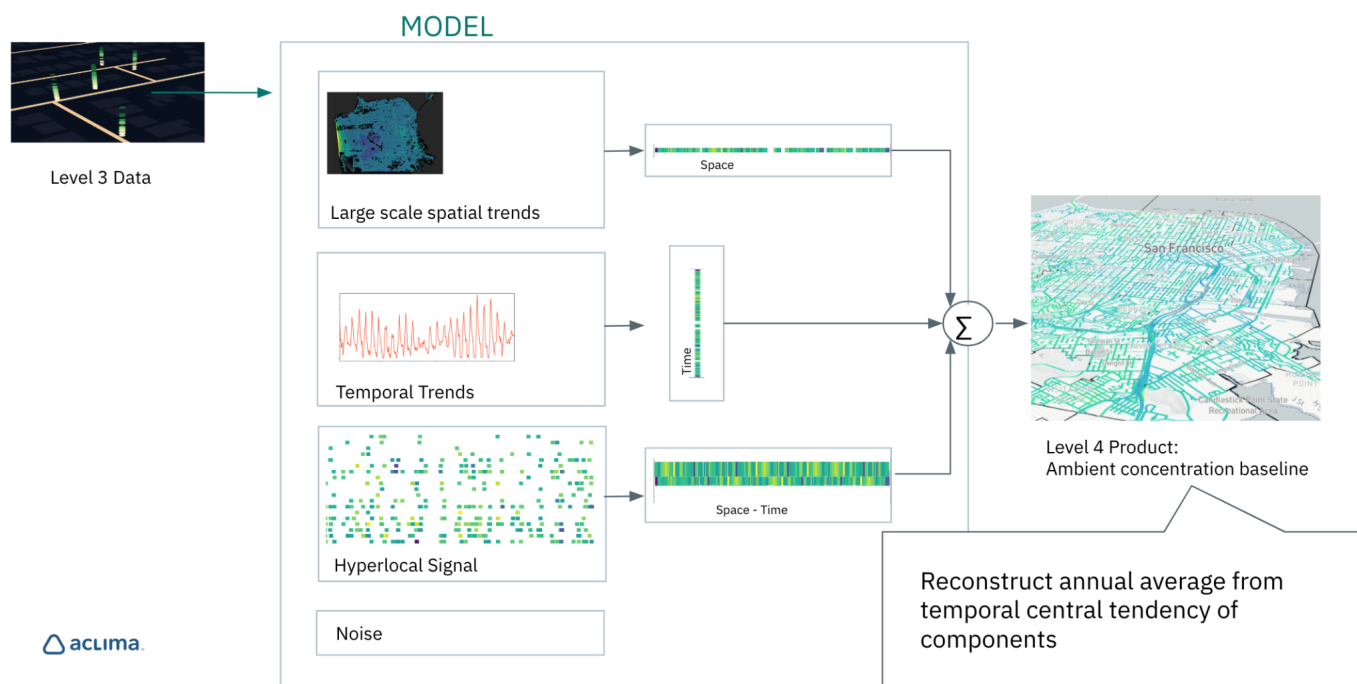


Figura 2 - Ilustración visual de cómo se producen las estimaciones de concentración ambiental para cada segmento combinando la tendencia central de las tendencias espaciales y temporales a gran escala con la señal hiperlocal.

Los módulos que componen este marco se adaptan a cada contaminante para garantizar la mejor estimación del promedio de sus concentraciones. El ruido y la estructura de las mediciones de entrada determinan la aplicabilidad de diferentes procesos de estimación para la descomposición y la reconstrucción. Los modelos basados en datos se presentan en las siguientes secciones.

3.1.1 Método de mediana normalizada de fondo

Descomposición y reconstrucción de señales

En el modelo de mediana normalizada de fondo, omitimos la descomposición de tendencias espaciales extensas y separamos directamente las tendencias temporales de la región de la señal hiperlocal. Un modelo de fondo se forma a partir de las tendencias temporales mediante la recopilación de información de nuestro dispositivo móvil.plataforma red.

Para cada una sola pasada de la unidad espacial relevante, la diferencia entre la concentración media de un solo paso para esa unidad espacial y la medición horaria de fondo se calcula para formar la señal hiperlocal. Esta diferencia refleja una mejora o disminución con respecto al modelo de fondo durante esa hora. La diferencia positiva o negativa observada se suma al nivel medio de contaminante del modelo de fondo durante toda la hora.período de tiempo de monitoreo, que luego puede reconstruirse con la mediana de la señal de fondo, reconstruyendo

las observaciones en una señal normalizada con diferenciales locales. La mediana temporal de estos datos reconstruidos para cada segmento proporciona la estimación promedio durante el período de monitoreo.

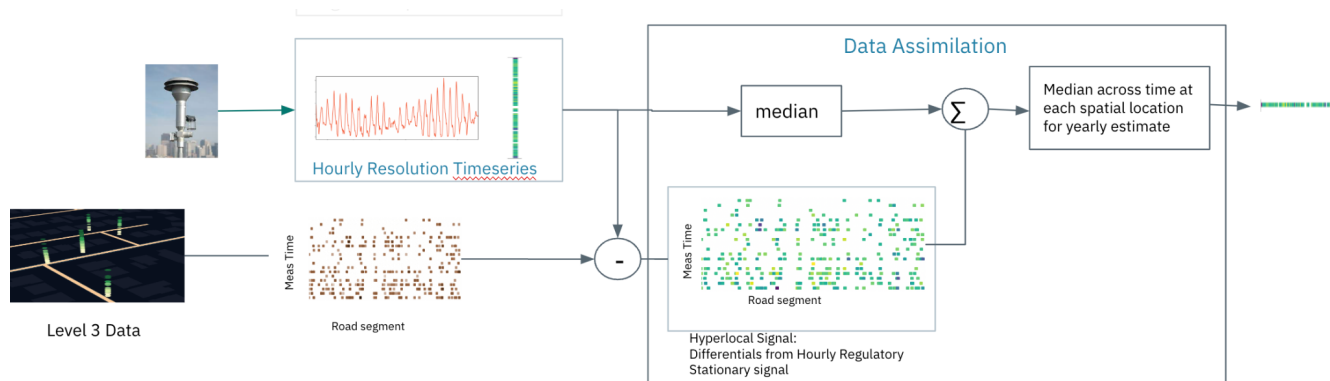


Figura 3: Ilustración visual del proceso mediano normalizado de fondo.

Modelo de fondo

La generación de modelos de fondo puede incluir la identificación de sitios estacionarios de monitoreo regulatorio relevantes y la derivación de un modelo de fondo directamente a partir de mediciones agregadas de sensores. Para SMMI, debido a que existe una disponibilidad inconsistente de monitores regulatorios adecuados en todas las áreas de monitoreo, se utilizarán fondos basados en sensores.

Las señales de fondo basadas en sensores se determinan agrupando las mediciones de los sensores a lo largo del tiempo y extrayendo un percentil coincidente con el comportamiento del contaminante. Los percentiles se eligen en función del ajuste de parámetros mediante la comparación con los sitios reguladores (si disponible), el ruido de los sensores y las expectativas sobre el comportamiento de los contaminantes. Por ejemplo, al modelar contaminantes en una pequeña zona urbana densa, un percentil alto para las concentraciones de ozono representa el fondo, ya que las emisiones locales sobre el fondo resultan en descensos en la concentración de ozono.

Metodología de intervalos creíbles

La estimación de la incertidumbre para las estadísticas a nivel de segmento para las concentraciones de contaminantes, específicamente la mediana normalizada de fondo, no se presta bien a los procedimientos estadísticos más comunes para calcular intervalos de confianza. Bajo muestra Los recuentos, las distribuciones de concentración no gaussianas y el ruido de las mediciones hacen que estos métodos sean inadecuados y difíciles de interpretar. Aclima utiliza el método Bootstrap bayesiano para estimar la incertidumbre asociada con cada unidad espacial durante el período de seguimiento. Este método remuestrea

aleatoriamente el conjunto de datos inicial, lo que resulta en una distribución de probabilidad sobre valores plausibles de la mediana dados los datos observados. Esta distribución de probabilidad se denomina distribución posterior en estadística bayesiana y permite estimar directamente los intervalos de incertidumbre para las estimaciones de los niveles típicos de contaminantes durante el período de monitoreo. Esta estimación de incertidumbre, o intervalo de credibilidad, es el equivalente en estadística bayesiana del intervalo de confianza.

Se realiza el procedimiento Bootstrap bayesiano para generar distribuciones posteriores para la unidad espacial Mediana de BN, a partir de la cual se pueden calcular estimaciones de incertidumbre. El proceso utiliza una distribución de Dirichlet uniforme, que modela la aleatoriedad de la probabilidad de resultados parametrizada por un vector de números positivos basado en el factor subyacente. datos de una sola pasada para un individuo unidad espacial y una serie de pases Una única réplica Bootstrap bayesiana utiliza la distribución de Dirichlet para muestrear los pesos de probabilidad (alfa) de los datos de pase para esa unidad espacial Para calcular distribuciones posteriores para la BNMedian, utilizamos la mediana ponderada de varios sorteos Una vez obtenidas las distribuciones posteriores de la BNMedian (mediana ponderada), se calculan intervalos de credibilidad del 95 por ciento y se informan como estimaciones de incertidumbre.

Es importante tener en cuenta que los intervalos de confianza están diseñados para capturar la precisión de la estimación, pero no son herramientas apropiadas para cuantificarla sistemático Sesgo que podría afectar la precisión de las estimaciones de contaminación. Ejemplos de sesgo sistemático incluyen el sesgo a nivel de dispositivo para sensores individuales y posibles inexactitudes en los modelos de sensores. A nivel de dispositivo, el sesgo sistemático se refleja mejor mediante calibraciones previas y posteriores a la implementación y los criterios de aceptación asociados.

3.1.2 Método de reconstrucción de medición estadística

Descomposición y reconstrucción de señales

Se utiliza un método estadístico para generar estimaciones de la concentración ambiental basadas en correlaciones entre las mediciones espaciales y temporales obtenidas durante el mapeo. El método está diseñado para tomar un conjunto de datos dispersos en el espacio y el tiempo y generar estimaciones de los niveles probables de contaminación en todas las ubicaciones y en todo momento, completando las lagunas. El método imputa datos de concentración de contaminación para todas las ubicaciones para todos los días, que se promedian durante el período de medición para obtener una única estimación de la concentración ambiental para cada ubicación en el lugar deseado unidad espacial.

Se utiliza un modelo aditivo general para identificar las tendencias espaciales y temporales a gran escala en el conjunto de datos de monitoreo móvil recopilados. Este modelo aditivo

general se basa en el establecimiento de correlaciones entre los datos de contaminantes del monitoreo móvil y fuentes de datos externas, incluyendo información sobre el tipo de carretera, datos topográficos, hora del día, tiempo transcurrido desde el inicio del monitoreo y datos de reconstrucción meteorológica en cuadrícula (de la NOAA). [Modelo de actualización rápida de alta resolución](#)). Una vez establecidas estas correlaciones, se utilizan para interpolar el conjunto de datos de monitoreo móvil, dispersos espacial y temporalmente, en todo el dominio espacial y temporal para el área y el período de monitoreo. Esto permite una representación consistente de la gran escala. Las tendencias atmosféricas en el espacio y el tiempo se aplicarán de forma consistente en todo el dominio de monitoreo para minimizar el sesgo de muestreo en las estimaciones finales de la concentración ambiental. Ejemplos de estas características a gran escala incluyen, por ejemplo, las tendencias estacionales o diurnas de los contaminantes atmosféricos, los eventos de contaminación a gran escala, como el transporte a larga distancia del humo de los incendios forestales, las diferencias en las concentraciones de contaminantes con la altitud y las diferencias en las concentraciones según el tipo de carretera (por ejemplo, autopistas o vías residenciales).

Los residuos de datos que quedan tras descomponer los datos recopilados en estas tendencias correlacionadas se consideran la señal «hiperlocal», que aún presenta una dispersión temporal y espacial. Esta señal residual se ve influenciada por la variabilidad local de los contaminantes del aire; por ejemplo, las columnas de contaminación de fuentes individuales que solo se detectan en zonas muy localizadas, como manzanas de ciudades. Estos datos se interpolan espacial y temporalmente mediante dos métodos de análisis geoespacial de uso común: DINEOF (Interpolación de datos con funciones ortogonales empíricas; Alvera-Azcárate et al. 2011) en combinación con un filtro Kalman (Akatsuka, 2023). Una limitación de este método es que este procedimiento podría no capturar adecuadamente eventos discretos de contaminación atmosférica muy localizados (p. ej., averías en instalaciones, incendios locales, etc.). Sin embargo, la ventaja es que la distribución espacial de las concentraciones más altas y más bajas que se muestra en el mapa resultante de concentraciones ambientales es menos propensa a ser influenciada por sesgos debidos al sesgo de muestreo temporal.

Cálculo de intervalo creíble

El resultado de los métodos combinados es una distribución de estimaciones para cada segmento y cada día. La estimación de la concentración ambiental reportada se toma como referencia central. tendencia (Media o mediana) de una distribución de valores generada mediante múltiples ensayos del conjunto de datos diarios. El intervalo de credibilidad se calcula a partir de la dispersión de esta distribución.

3.1.3 Mapeo de métodos de contaminantes

La siguiente tabla muestra los métodos empleados para cada contaminante de la Plataforma Móvil Aclima. La existencia de varios métodos para un mismo contaminante indica que se ha

generado una estimación de concentración promedio utilizando cada uno de ellos desde 2019. Aclima determina el modelo más adecuado para producir la estimación de la concentración ambiental en función del contaminante y la disponibilidad de datos relevantes. El método de validación de estos enfoques se analiza en la Sección 5.

Contaminante	Mediana normalizada de fondo	Reconstrucción de mediciones estadísticas	Mediana
CO	incógnita	incógnita	
CO ₂	incógnita	incógnita	
P.M _{2.5}		incógnita	
O ₃	incógnita	incógnita	
NO ₂	incógnita	incógnita	
Carbono negro	incógnita		incógnita
Diversos tóxicos del aire ¹	incógnita		incógnita

4.0 Métrica Para la adecuación de la recaudación

El grado en el que nuestras estimaciones de concentración ambiental son representativas de las concentraciones típicas observadas durante el período de muestreo depende de (1) tener suficientes observaciones (es decir, un promedio de visitas repetidas a carreteras en el área de mapeo) durante el período del contrato y (2) que dichas observaciones son suficiente mente distribuidos a lo largo del período de medición para tener en cuenta la variación intrínseca de los niveles de contaminantes.

Aclima utiliza un algoritmo de muestreo dinámico que se actualiza diariamente con el objetivo de recopilar datos que maximicen la mejora en la caracterización de la calidad del aire, en lugar de especificar un número determinado de muestras en cada tramo de carretera. El sistema garantiza la recopilación de datos suficiente para respaldar las estimaciones de concentración ambiental con resolución espacial, y el muestreo se distribuye deliberadamente para proporcionar mayores tasas de repetición de mediciones en las ubicaciones con mayor variabilidad observada. El algoritmo de conducción está diseñado para completar un promedio de 20 repeticiones de mediciones distribuidas en todas las carreteras residenciales y

¹Los tóxicos del aire medidos por los laboratorios móviles de los socios del SMMI pueden utilizarse para generar estimaciones de concentración ambiental.

principales de todos los grupos de bloques censales. Generalmente, veinte repeticiones de mediciones son el punto en el que las repeticiones adicionales sólo proporcionan reducciones marginales de la incertidumbre (Apte et al. (2017). El algoritmo de muestreo dinámico considera diferentes ubicaciones que requieren un número diferente de repeticiones de mediciones para lograr esto, con el fin de optimizar el uso de los recursos de monitoreo. Puede encontrar más detalles sobre el algoritmo en el Sistema de Garantía de Calidad de Medición Móvil de Aclima, Sección 3.1)..

Rutas de circulación identificadas como influenciadas por la autocontaminación (Sección 2.2) no se incluyen como parte del recuento de pases.

5.0 Validación de las estimaciones de concentración agregada del segmento

El valor único de los mapas hiperlocales resultantes de la cartografía móvil también dificulta la validación, ya que no se dispone de datos independientes con esta resolución espacial para su comparación. Para solucionar esto, hemos desarrollado diversos enfoques para validar el rendimiento de nuestras estimaciones de concentración ambiental. En esta sección se presentan los resultados de estos enfoques utilizando datos históricos agregados a un agregado espacial de un segmento de carretera de 100 m.

5.1 Validación por comparación con mediciones regulatorias

Cuantificar la incertidumbre a nivel de dispositivo es clave para comprender la calidad de los datos de los mapas hiperlocales, pero estas incertidumbres no se propagan necesariamente de forma directa a los productos de datos finales. Por ello, el enfoque de Aclima consiste en comparar nuestras mediciones móviles con mediciones estacionarias (p. ej., de referencia regulatoria) cuando dichos datos están disponibles, para cuantificar directamente la incertidumbre con respecto a los métodos tradicionales y establecidos para medir las concentraciones ambientales de contaminantes a lo largo del tiempo. En regiones donde se dispone de un número adecuado de sitios de referencia, las comparaciones entre dispositivos móviles y estacionarios pueden proporcionar estadísticas básicas para describir la incertidumbre de forma amplia en toda la región cartográfica, extrapolando a ubicaciones donde no existen sitios de referencia.

Hemos adoptado dos enfoques para la evaluación de mapas basados en sitios regulatorios. Estos incluyen: (1) un enfoque de resolución temporal donde las medias de paso de cada segmento se comparan con los datos promedio horarios apropiados (Sección 5.1.1) y (2) un enfoque de integración temporal donde las estimaciones de concentración ambiental se comparan con el valor mediano reportado por la estación durante el mismo período (Sección 5.1.2). El primer enfoque es una extensión de la evaluación de la calidad de los datos a nivel de

dispositivo, pero permite la agregación del sesgo en todos los dispositivos que contribuyen al mapa hiperlocal. Además, permite la determinación de las diferencias entre redes que podrían resultar, por ejemplo, de diferencias sistemáticas en las fuentes de calibración utilizadas o diferencias entre diferentes técnicas de medición (es decir, ópticas) partícula Detección vs. detección gravimétrica de $PM_{2.5}$). El segundo enfoque proporciona una cuantificación de la incertidumbre general del resultado final.concentraciones típicas, incluyendo la incertidumbre a nivel de dispositivo, la incertidumbre del muestreo y la incertidumbre resultante del enfoque de modelado utilizado para generar las estimaciones de concentración ambiental. Los resultados que se presentan aquí se basan en el mapeo móvil realizado en toda California. entre 2019 y 2021 y utilizar los datos reglamentarios informados al Sistema de Información de Monitoreo de la Calidad del Aire del Distrito de Gestión de la Calidad del Aire de California (CARB AQMIS) durante el mismo período. A medida que Aclima continúe mapeando en más regiones, esperamos refinar estas estimaciones de incertidumbre y determinar la relevancia de estos resultados para otras ubicaciones, incluidas las zonas con una red limitada de medición de la calidad del aire.

Las mediciones del sitio regulatorio pueden ser representativas espacialmente en escalas de varios metros a varios kilómetros, dependiendo del tipo de sitio [definido por la USEPA \(página 5\)](#) Sin embargo, las comparaciones directas entre las mediciones móviles y las mediciones del sitio regulatorio pueden ser complicadas debido al hecho de que las mediciones móviles representan Condiciones en carretera, con alta variabilidad según los diferentes tipos de carreteras. Como resultado, es importante considerar las escalas de agregación espacial y temporal, así como la distancia máxima permisible entre las concentraciones estacionarias y móviles, a la que nos referiremos como *buffer de distancia* en la siguiente discusión.

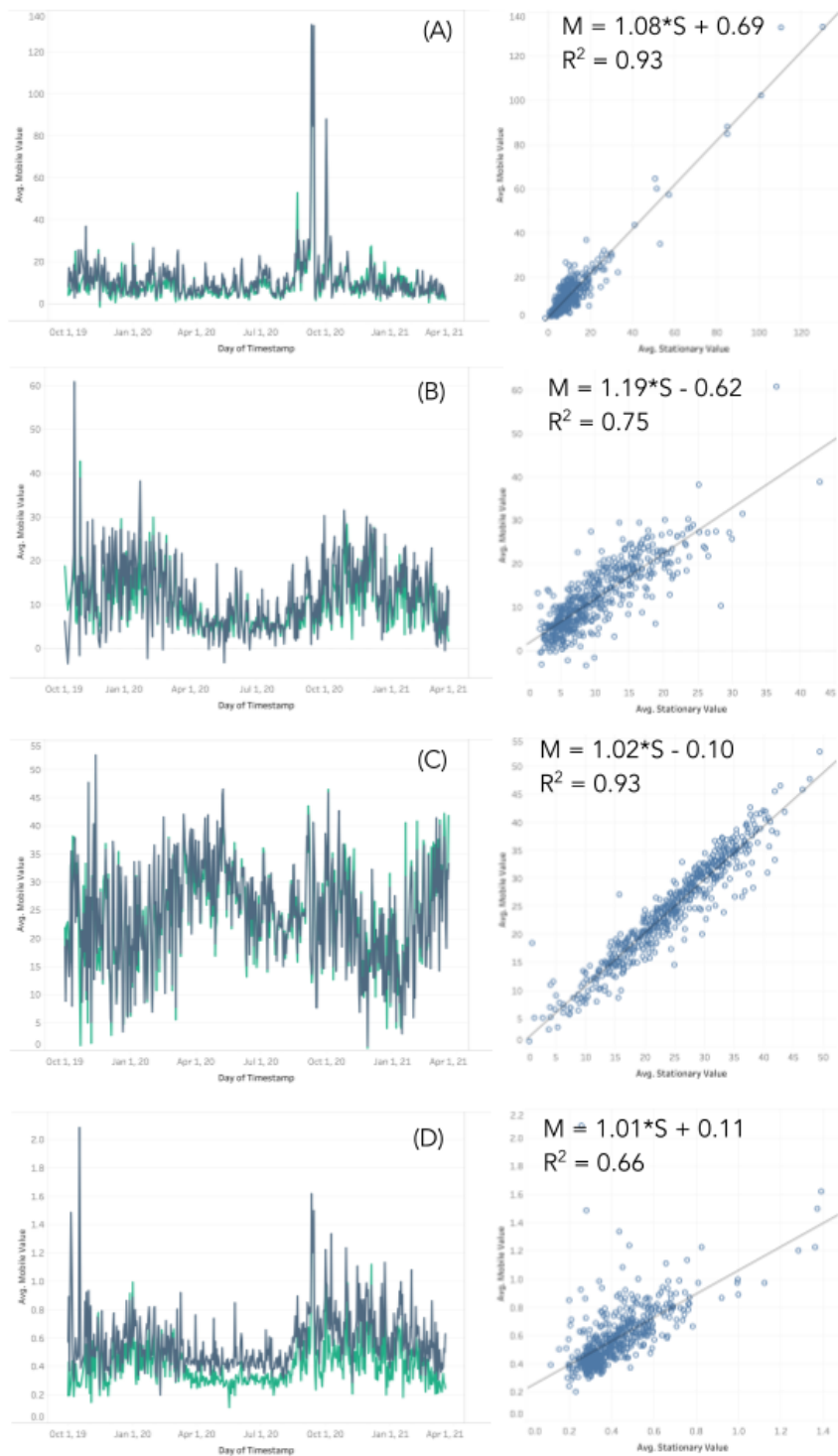
Análisis profundo previo (Whitehill et al., 2024, LaFranchi et al., 2022, Solomon et al., 2020) han demostrado que la clave para realizar una comparación significativa entre mediciones móviles y estacionarias reside en reducir el ruido aleatorio en la comparación debido a la variabilidad atmosférica. Para ello, se maximiza el número de muestras de colocación, se minimiza el margen de distancia y se descartan los tipos de carreteras con alta variabilidad (p. ej., autopistas). Con suficientes muestras de colocación en un radio pequeño, es posible caracterizar con precisión el sesgo entre las mediciones en carretera (tanto con resolución temporal como integradas en el tiempo) y una red de referencia estacionaria.Si bien hemos encontrado (Whitehill y otros, 2024)Dado que puede haber altos grados de correlación entre mediciones móviles y estacionarias incluso en distancias de 3 a 5 km, elegimos utilizar un radio de 250 m para esta evaluación para reducir la probabilidad de errores espaciales variabilidad influyendo en los resultados.

5.1.1 Comparación resuelta en el tiempo de las mediciones de sensores móviles con las normativas mediciones

Para evaluar la calidad de las mediciones de AMN día a día, Aclima comparó los datos del segmento medio de un solo paso para $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 y el CO_2 recolectado en un radio de 250 m alrededor de un sitio regulatorio con los datos reportados por dicho sitio. Las concentraciones medias de una sola pasada medidas dentro de este radio para cada contaminante se promediaron a 24 horas en todos los dispositivos y sitios y se compararon con la media diaria de las mediciones del sitio regulatorio para las horas en que el vehículo se encontraba dentro del margen de distancia. Por ejemplo, si el vehículo se encontraba cerca del sitio a las 10:00, 14:00 y 23:00, solo se utilizaron los datos correspondientes a las mismas horas del sitio regulatorio. Tenga en cuenta que más de un vehículo/dispositivo puede formar parte de la comparación para un día determinado, y la comparación temporal general seguramente estará compuesta por datos de varios vehículos. Esta comparación proporciona una indicación de la calidad general de los datos del dispositivo AMN *en el sitio* y en muchos dispositivos, así como una visión del valor de los datos agregados en diferentes escalas espaciales y temporales.

Para esta evaluación, nos centramos en los datos recopilados en la región del Distrito de Gestión de la Calidad del Aire del Área de la Bahía (BAAQMD). Se promediaron los datos de todos los vehículos y sitios relevantes de la región (es decir, los sitios que reportaron mediciones del contaminante y tenían carreteras a menos de 250 m del sitio) para realizar una evaluación de toda la red. El número de sitios reguladores utilizados en la comparación osciló entre 14 y 17, dependiendo del contaminante. Cifra 5 Presenta series de tiempo y análisis de regresión para $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 , y CO para los valores promedio diarios. Excelente concordancia temporal del promedio diario ($R^2 > 0,9$) con poco sesgo ($< 8\%$) se observa para $PM_{2.5}$ y O_3 . Acuerdo para el NO_2 y el CO se reduce ligeramente ($R^2 > 0,65$) con un sesgo inferior al 20 % para ambos. Estos resultados son comparables con otras estimaciones más directas de la calidad de los datos a nivel de dispositivo, obtenidas de nuestras auditorías de calibración previas y posteriores a la implementación, así como de un estudio independiente de colocación en paralelo realizado en el centro de monitoreo de Laney College en Oakland, California.

Plan de Monitoreo del Aire de la Comunidad: Apéndice D (v2.1)
Iniciativa de monitoreo móvil a nivel estatal



Cifra 5. Comparación de las mediciones diarias medias del sensor móvil (M) dentro de un círculo de radio de 250 m centrado en un regulador estacionario sitio a datos horarios promedio diarios en ese sitio regulatorio (S). Datos para todos los Las mediciones de plataformas móviles a menos de 250 m de un sitio regulatorio se comparan con las de dicho sitio dentro del período de referencia. Se presentan series temporales diarias (columna izquierda) y análisis de recesión con estadísticas de regresión (columna

derecha) para A) $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$]; B) NO_2 [ppb]; C) O_3 [ppb]; y D) CO [ppm]. Se utilizó una regresión de eje mayor tipo II sin ponderación.

Estos resultados, en relación con las mediciones FRM y FEM de incertidumbre conocida con precisión en sitios regulatorios estacionarios, confirman que las plataformas móviles de Aclima logran datos de alta calidad a escalas espaciales hiperlocales, de bloque por bloque y de toda la comunidad con aceptable Sesgo y muy buena concordancia temporal. Por ejemplo, basándose en una extensa búsqueda bibliográfica y talleres internacionales sobre sensores, la USEPA ha desarrollado un borrador de valores objetivo para sensores de contaminación atmosférica que miden $PM_{2.5}$ y O_3 (Williams y otros, 2019; Duvall et al., 2020). Las métricas de desempeño reportadas (Duvall et al., 2021) incluyeron precisión, sesgo e intersección, coeficiente de determinación (R^2) y error (RMSE) para $PM_{2.5}$ y O_3 . Los objetivos de calidad de los datos de los sensores móviles de Aclima cumplen o superan las directrices de rendimiento de la EPA para $PM_{2.5}$ y O_3 . La USEPA ha evaluado el rendimiento del sensor para NO_2 , CO (Duvall et al.) pero no ha resumido formalmente los hallazgos como se hizo con $PM_{2.5}$ y O_3 .

5.1.2 Integrado en el tiempo comparación de las estimaciones de concentración ambiental con las mediciones reglamentarias

Para evaluar el desempeño general del Producto de Datos de Concentración Ambiental, las estimaciones de concentración ambiental (ACE) en agregaciones de segmentos de carretera de 100 m dentro de un radio de 250 m de un sitio regulatorio se compararon con la concentración media anual de ese sitio regulatorio para cada contaminante durante el mismo período de tiempo de recopilación de datos de monitoreo móvil. (Nota: el BC no está incluido ya que aún no hay suficientes mediciones móviles de BC dentro de los 250 m de una estación reguladora que también informen sobre el BC). Aquí presentamos un ejemplo de ello. evaluación usando datos recopilados en toda California, incluida la región BAAQMD, así como en vecindarios de San Diego, Sacramento, Los Ángeles y San Bernardino. Nosotros realizaremos este mismo análisis cada vez que completamos el mapeo.

Tabla 2 Presenta varias métricas de evaluación para la combinación de todos los sitios regulatorios y todos los datos recopilados en toda California Basado en las diferencias observadas ($D_{j,s}$) entre cada segmento (s) y el sitio estacionario (j) Esta colección de $D_{j,s}$ Los valores se agregan para calcular una media ($\bar{D}_{yo}$) y una desviación estándar (σ_{DJ}) para cada sitio. Las métricas de evaluación se basan en $\bar{D}_{yo}$ se definen entonces de la siguiente manera:

- **Error de sesgo medio (MBE)**, que proporciona una estimación del sesgo sistemático entre nuestras mediciones ACE y regulatorias

$$MBE = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{D}_{yo})}{N}$$

- **Error absoluto medio (EMA)**, que proporciona una estimación del sesgo absoluto entre nuestras mediciones ACE y regulatorias en todos los sitios

$$ES = \frac{\sum_{j=1}^N (|\bar{D}_{yo}|)}{N}$$

- **Error cuadrático medio centrado (CRMSE)**, que es una versión ajustada por sesgo del error cuadrático medio, y brinda una estimación de la precisión de los valores de ACE en comparación con las mediciones regulatorias, donde las diferencias de valores atípicos tienen mayor ponderación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\bar{D}_{yo})^2}{N}}$$

$$CRMSE = \sqrt{RMSE^2 - \text{Miembro de la Orden del Imperio Británico}^2}$$

- **Coefficiente de correlación (R^2)**, determinado a partir de una regresión lineal (MCO) entre la concentración media de ECA alrededor de cada sitio ($\bar{AS}_{yo}$) y los valores medianos estacionarios para cada sitio, j, que proporciona una medida de la capacidad del mapa ACE para reproducir la varianza observada en la red estacionaria.
- **Desviación estándar (σ_D)**, que describe la variabilidad a nivel de segmento alrededor de cada sitio, lo que refleja la variabilidad local real debido a diferentes tipos de caminos y fuentes locales, así como la incertidumbre de precisión aleatoria para los valores de ACE en las agregaciones de segmentos.

$$\sigma_D = \frac{\sum_{j=1}^N (\sigma_{Dj})}{N}$$

Mesa 2: Métricas de desempeño para la comparación de agregados de segmentos de mapas dentro de los 250 m de un sitio regulatorio con ese sitio para todas las ubicaciones del sitio regulatorio y períodos de referencia.

	Miembro de la Orden del Imperio Británico	HAY	CRMSE	R^2	pag _o
P.M _{2.5}	+0,5 µg/m ³ (11%)	1,7 µg/m ³ (23%)	2,2 µg/m ³ (30%)	0.40	0,8 µg/m ³

	Miembro de la Orden del Imperio Británico	HAY	CRMSE	R ²	pag _o
NO ₂	-0,2 ppb (-5%)	1,7 ppb (30%/22%*)	2,2 ppb (44%/28%*)	0,77	2,0 ppb
O ₃	+0,4 ppb (+2%)	1,2 ppb (5%)	1,4 ppb (6%)	0,82	0,8 ppb
CO	+0,04 ppm (+15%)	0,06 ppm (21%)	0,07 ppm (25%)	0.11	0,04 ppm

* NO₂ Los valores % MAE y % CRMSE están fuertemente influenciados por varios sitios donde NO₂ las concentraciones son relativamente bajas. Al excluir los sitios con una concentración media anual inferior al doble del valor de CRMSE, el % de MAE y el % de CRMSE se reducen al 22 % y al 28 %, respectivamente.

Los resultados de la Tabla 2 pueden interpretarse como incertidumbre general para estimaciones de concentración ambiental Combinando las incertidumbres de toda la plataforma, incluyendo las incertidumbres a nivel de dispositivo, muestreo y modelado. Para poner estos resultados en perspectiva, estas métricas también se calculan como un porcentaje utilizando las diferencias relativas para cada sitio y se comparan con los umbrales de incertidumbre indicados para diferentes casos de uso según la Guía de Sensores de Aire de la EPA (Williams et al., 2014), como se muestra en la Tabla 3. El sesgo (como MAE) varía entre el 5 % (O₃) al 30% (NO₂). El sesgo sistemático (como MBE) es relativamente bajo, oscilando entre -5% (NO₂) a +15% (CO), lo que indica que la mayoría de las fuentes de incertidumbre en el producto de datos ACE son aleatorias.

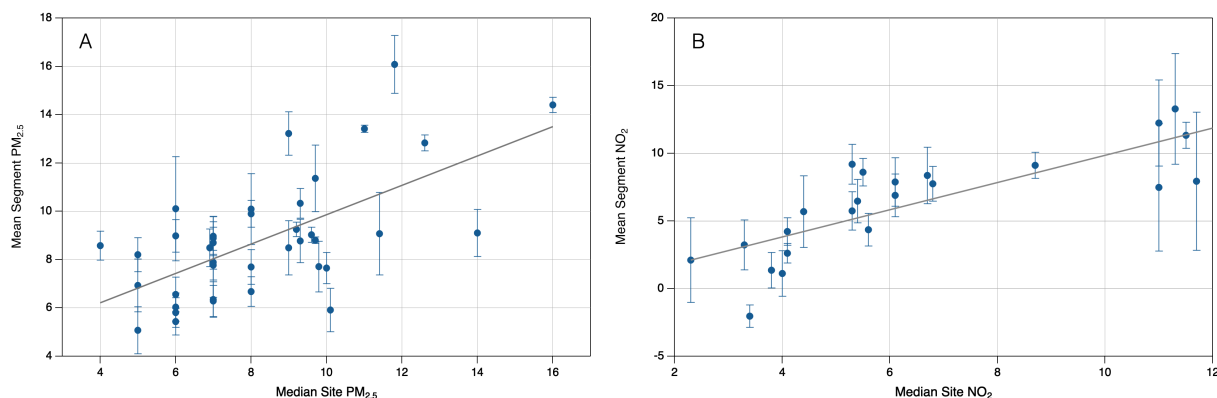
La precisión (como CRMSE) varía entre el 6% (O₃) al 44% (NO₂). Como porcentaje, NO₂ sesgo y la precisión son algo altos (aproximadamente entre un 30 y un 45 %), sin embargo, esto se debe a las altas incertidumbres relativas en varios sitios donde las concentraciones medias anuales son inferiores a 5 ppb. Excluyendo estos niveles bajos de NO₂ sitios, el % de precisión y el sesgo son ambos <30%. El caso de uso de identificación de ollas (Nivel II) para los 4 contaminantes de criterio es alcanzable. Para O₃, el % de sesgo y el % de precisión son lo suficientemente bajos para ser utilizados en el caso de uso de Monitoreo Suplementario (<20%).

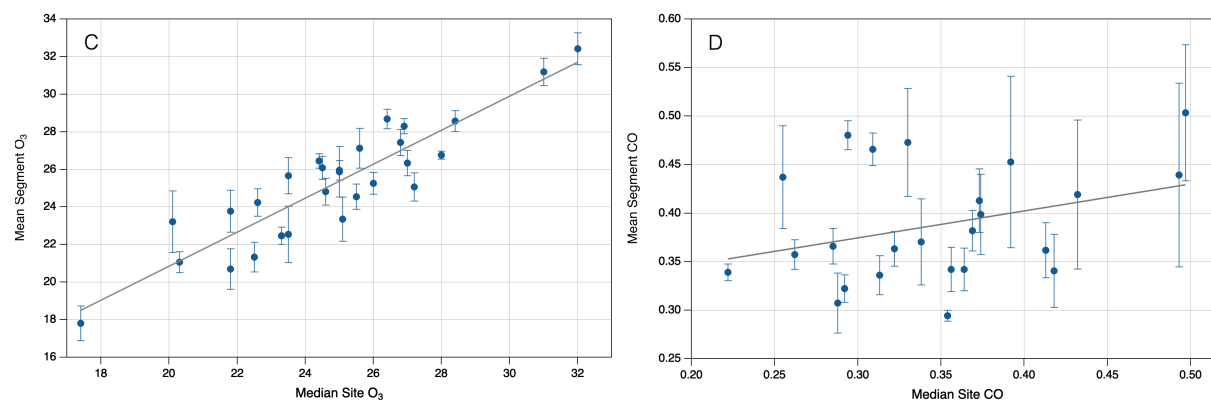
Tabla 3: Adaptado de la Guía de sensores de aire de la EPA (Williams et al., 2014), que muestra los diferentes casos de uso escalonados para sensores según la precisión y la incertidumbre de sesgo junto con las modalidades de productos de datos ACE adecuadas para cada nivel.. Niveles Cuando los productos de datos ACE no respaldan el caso de uso se enumeran como no aplicables (NA).

Nivel	Caso de uso	Incertidumbre de precisión y sesgo	Modalidades del producto de datos ACE
I	Educación e información	<50%	NO ₂ , O ₃ , PM _{2.5} , CO
II	Identificación y caracterización de puntos calientes	<30%	NO ₂ *, O ₃ , PM _{2.5} , CO
III	Monitoreo suplementario	<20%	O ₃
IV	Exposición personal	<30%	ESO
V	Regulador	O ₃ (<7%) PM _{2.5} (<10%) NO ₂ (<15%) CO (<10%)	ESO

*En lugares donde NO₂ ACE son superiores a ~5 ppb.

Para ilustrar mejor las comparaciones entre las concentraciones de ECA y las concentraciones del sitio estacionario, Figura 6 muestra el diagrama de dispersión entre ACE y sitios estacionarios, con barras de error en la figura que representan σ_{DJ} para la colección de segmentos alrededor de cada uno $\overline{AS}_{yo}$ Valor. Las líneas de mejor ajuste que se muestran son el ajuste por mínimos cuadrados ordinarios a los datos, en función de la concentración mediana del sitio regulador. Las correlaciones de estos gráficos entre los datos se muestran en la Tabla 5 como R²Se calcula mediante mínimos cuadrados ordinarios. Además, la desviación estándar del conjunto de segmentos alrededor de cada ubicación también se muestra alrededor del valor medio de cada segmento como medida de la variabilidad entre segmentos en cada sitio.





Cifra 6. Comparación de la concentración media anual del segmento de referencia dentro de los 250 m desde la mediana anual del sitio regulador para cada sitio para el que fue posible una comparación para (A) $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$), (B) NO_2 (ppb), (C) O_3 (ppb) y (D) CO (ppm). La desviación estándar del conjunto de segmentos dentro del radio de 250 m que componen la media se muestra como barras de error alrededor del valor medio. La línea de tendencia es el resultado de un ajuste lineal MCO a los datos.

Las cifras muestran una concordancia general con la línea de tendencia, con O_3 y NO_2 mostrando fuertes correlaciones, con R^2 de aproximadamente 0,8 para ambos, Mientras que CO tiene una correlación pobre ($R^2 = 0,1$) y el $PM_{2.5}$ Tiene una correlación moderada ($R^2 = 0,4$). La incertidumbre de precisión (como CRMSE) para el CO es aproximadamente del mismo orden de magnitud (0,07 ppm) que la desviación estándar de las concentraciones de CO observadas en todos los sitios reguladores utilizados en este análisis. De igual manera, $PM_{2.5}$ La variabilidad entre los sitios utilizados en el análisis es relativamente pequeña ($2,6 \mu g/m^3$) en comparación con el CRMSE de $2,2 \mu g/m^3$. Como resultado, los valores de R^2 tanto para CO como para $PM_{2.5}$ Es probable que no reflejen el verdadero rendimiento que se obtendría en comparación con redes estacionarias que capturan un rango más amplio de concentraciones. A medida que Aclima siga recopilando datos en ubicaciones más diversas, seguiremos perfeccionando estas estimaciones de incertidumbre y aumentando la confianza en su generalización a más ubicaciones.

Este análisis no es posible actualmente para CH_4 , CO_2 , C_2H_6 , y BC debido a la disponibilidad de datos para estos contaminantes en sitios estacionarios adecuados en ubicaciones que Aclima ha mapeado hasta la fecha.

5.2 Contabilización del sesgo de medición sistemática

En los ejemplos proporcionados en la Sección 5.1, el sesgo entre las Estimaciones de Concentración Ambiental y las mediciones regulatorias existentes fue relativamente bajo para todos los contaminantes evaluados. Si bien un sistema de aseguramiento de la calidad de las mediciones sólido y bien ejecutado es clave para minimizar este sesgo sistemático, la posibilidad de un sesgo significativo siempre es posible al comparar dos redes de medición

diferentes operadas por organizaciones diferentes que utilizan diferentes estándares primarios, métodos de detección y niveles de calidad de datos. Seguimos evaluando el rendimiento del sensor Aclima en comparación con diferentes equipos de referencia, con un programa continuo de investigación y desarrollo para comprender cómo varía la precisión en diferentes ubicaciones con diferentes fuentes y concentraciones de contaminación, meteorología y otros factores. Los sensores de la plataforma que no se comparan rutinariamente directamente con un método de referencia (CO, PM2.5 y carbono negro) como parte de su procedimiento de calibración estándar pueden ser particularmente propensos al sesgo sistemático.

Además del enfoque descrito en la Sección 5.1.1, que consiste en utilizar comparaciones con resolución temporal entre mediciones móviles y regulatorias para evaluar la calidad de las mediciones de AMN, la colocación directa de la AMN de Aclima y los sensores asociados en los sitios de monitoreo existentes constituye un enfoque adicional que puede utilizarse para aumentar la confianza en la caracterización del sesgo de los sensores. Asimismo, este enfoque puede ayudar a identificar cualquier correlación temporal con el grado de sesgo que pudiera pasarse por alto en las comparaciones entre dispositivos móviles y estacionarios (es decir, estacional, horario, condiciones meteorológicas variables, etc.), así como proporcionar un contexto valioso para interpretar el sesgo resultante de las comparaciones de mediciones móviles y estacionarias en toda la flota.

Al finalizar un período de medición para las estimaciones de concentración ambiental, Aclima tiene la opción de utilizar estas comparaciones in situ para corregir el sesgo sistemático en ciertos casos. Este proceso ayuda a armonizar mejor las mediciones de Aclima con las redes de medición existentes, que suelen ser la mejor fuente de información fiable para un contaminante determinado. Si bien este enfoque puede aplicarse a cualquier contaminante, un escenario típico donde se prevé que sea necesario es el de PM2.5. Se ha observado que los parámetros utilizados en el modelo del sensor que convierte las mediciones de recuento de partículas de Aclima a PM2.5 varían según la geografía, debido a las diferencias en la distribución del tamaño y la composición química del aerosol ambiental en estas ubicaciones. Además, existen fuentes conocidas de sesgo incluso entre diferentes métodos regulatorios aprobados (Métodos Federales Equivalentes o FEM) para medir PM2.5, y se ha encontrado que el sensor PM2.5 de Aclima tiene diferentes grados de sesgo sistemático cuando se lo compara con diferentes métodos FEM para medir PM2.5. En los casos en que se considera que estas fuentes de sesgo sistemático son significativas, se utilizan las comparaciones in situ para derivar el conjunto óptimo de parámetros que se deben aplicar a una ubicación geográfica particular antes de generar las estimaciones finales de concentración ambiental.

5.3 Validación adicional de las estimaciones de concentración ambiental generadas por el modelo

Las estrategias de modelado de Aclima se validan a través de varios enfoques. Además de las comparaciones con monitores estacionarios descritas anteriormente, utilizamos una serie de escenas de prueba para evaluar la capacidad de un modelo para capturar características espaciales y temporales específicas en las concentraciones de contaminación atmosférica, como gradientes espaciales pronunciados. Además, utilizamos estrategias de validación autónomas para calcular errores con subconjuntos de mediciones frente a las predicciones del modelo, así como para evaluar su estabilidad.

5.3.1 Evaluación mediante escenas de prueba

Probamos nuestros modelos con una serie de escenas de prueba, de forma similar a la calibración indirecta de sistemas de teledetección contra objetivos con reflectancia superficial constante y conocida. Consideramos que el modelo abarca tanto la estrategia de muestreo (las trayectorias reales y los tiempos de medición de nuestra flota en la región) como los algoritmos para estimar las concentraciones, ya que están acoplados de forma natural. Estas escenas de prueba no pretenden capturar la complejidad total de la atmósfera ni los patrones resultantes en las concentraciones de contaminantes. En cambio, se seleccionaron intencionalmente para someter a prueba un modelo a pruebas de estrés frente a características observables específicas de forma repetible. Estas escenas de prueba permiten calcular la resolución efectiva del modelo frente a un amplio conjunto de señales.

5.3.2 Estrategias de validación autónomas

Las estrategias de validación autónomas utilizan subconjuntos de la medición frente a la predicción del modelo para calcular errores y también pueden utilizarse para evaluar la estabilidad del modelo. Nuestras estrategias de validación autónomas incluyen la bondad de ajuste interna, el entrenamiento de sensibilidad de parámetros, la validación fuera de la muestra y la validación frente a datos de terceros.

6.0 Referencias

Alvera-Sugar, A.; Barth, A.; Sirjacobs, D.; Lenartz, F.; Beckers, J.-M. Funciones ortogonales empíricas de interpolación de datos (DINEOF): una herramienta para el análisis de datos geofísicos. *Meditación. Mar. Ciencias. Especulación*. Número 2011, 5–11.

Apte, J.S., Messier, K.P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T.W., Lunden, M.M., Marshall, J.D., Portier, C.J., Vermeulen, R.C.H. y Hamburg, S. 2017. Mapeo de la contaminación atmosférica de

alta resolución con vehículos de Google Street View: Explotación de macrodatos. Environ. Sci. Technol. 51, 6999–7008.

Duvall, R., Clements, A. y Goodman, L. 2020. Resumen del trabajo de la EPA de EE. UU. en el desarrollo de protocolos y objetivos de pruebas de rendimiento para sensores de aire de ozono y PM_{2.5}. Presentado en la Conferencia Internacional de Sensores de Aire, Serie Virtual, 29 de octubre de 2020.

Duvall, R. M., Hagler, G. S. W., Clements, A. L., Benedict, K., Barkjohn, K., Kilaru, V., Hanley, T., Watkins, N., 1045 Kaufman, A., Kamal, A., Reece, S., Fransioli, P., Gerboles, M., Gillerman, G., Habre, R., Hannigan, M., Ning, Z., Papapostolou, V., Pope, R., Quintana, P. J. E., y Lam Snyder, J. 2021. Deliberación sobre objetivos de desempeño: Taller de seguimiento sobre gestión de proyectos.¹⁰, NO₂Objetivos de sensores de aire de CO y SO₂, entorno atmosférico, 118099.

Kock, J., Demirel, M.C., y Stisen, S., 2018. Métrica de Eficiencia Espacial (SPAEF): evaluación multicomponente de patrones espaciales para la optimización de modelos hidrológicos. Geosci. Model Dev., 11, 1873-1886.

LaFranchi, B., Ridley, D., Trickett, C., Kwasnica, M., Chow, M., Lunden, M., George, K., Smith, J. y Vona, M. Calibración de redes de sensores ciudadanos mediante una plataforma móvil de monitoreo del aire. Presentado en la Conferencia Internacional de Sensores del Aire 2022, 11 de mayo de 2022, Pasadena, California.

Solomon, P. A., Vallano, D., Lunden, M., LaFranchi, B., Blanchard, C. L. y Shaw, S. L. 2020. Medición de concentraciones de contaminantes atmosféricos mediante plataformas móviles en California: Evaluación del rendimiento, métodos estadísticos para evaluar variaciones espaciales y representatividad espacial. Atmos. Meas. Tech. 13, 3277–3301.

Williams, R., Vasu Kilaru, E. Snyder, A. Kaufman, T. Dye, A. Rutter, A. Russell y H. Hafner. Guía de sensores de aire. Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., Washington, D. C., EPA/600/R-14/159 (NTIS PB2015-100610), 2014.

Williams, R., R. Duvall, V. Kilaru, G. Hagler, L. Hassinger, K. Benedict, J. Rice, A. Kaufman, R. Judge, G. Pierce, et al., 2019. Taller sobre deliberación de objetivos de desempeño: Posibles caminos para la gestión de proyectos emergente.^{2.5} y O₃ Progreso del sensor de aire. Atmósfera. Ambiente. X 2:100031.

Whitehill, A.R., Lunden, M.M., LaFranch, B., Kaushik, S. y Soyoomon, P.A. 2024 Monitoreo y comparación de la calidad del aire móvilCapacidad de conectarse a sitios de monitoreo estacionarios para garantizar la calidad durante implementaciones móviles.Atmos. Meas. Tech. 17, 2991-3009..

Akatsuka, H. y Terada, M. Aplicación del filtro de Kalman a datos geoespaciales a gran escala: Modelado de la dinámica poblacional. ACM Trans. Spatial Algorithms Syst. 9, 1, artículo 6 (marzo de 2023).