



Análisis de Calidad del Aire

Valle Central — Costa Rica (2025)

Informes técnicos: 2025

Daniel Poleo Brito

Departamento de Desarrollo — Instituto Meteorológico Nacional

Introducción

- La calidad del aire es un indicador clave de salud pública y ambiental.
- Contaminantes criterio analizados: PM10, PM2.5, O₃, NO₂, SO₂ y CO.
- El IMN opera una red de 7 estaciones en el GAM y zonas adicionales (Liberia).
- El Índice Costarricense de Calidad del Aire (ICCA) clasifica del color verde (buena) al púrpura (peligrosa).
- Objetivo: evaluar el cumplimiento de la normativa nacional (Decreto Ejecutivo No. 39951-S) y las guías de la OMS.
- Período de análisis: Febrero, Marzo, Abril y Septiembre 2025.
- Factores forzantes en 2025: tráfico vehicular, incendios forestales, erupciones del Volcán Poás y eventual transporte de polvo del Sahara.

Marco Normativo — Valores Límite (Decreto No. 39951-S)

Contaminante	Promedio de Tiempo	Valor Límite
Material Particulado (PM10)	Promedio anual	40 µg/m³
Material Particulado (PM10)	Promedio de 24 horas	75 µg/m³
Material Particulado (PM2.5)	Promedio anual	15 µg/m³
Material Particulado (PM2.5)	Promedio de 24 horas	25 µg/m³
Ozono (O ₃)	Promedio de 8 horas	100 µg/m³
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Promedio anual	40 µg/m³
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Promedio de 1 hora	200 µg/m³
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Promedio de 24 horas	20 µg/m³
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Promedio de 1 hora	500 µg/m³
Monóxido de Carbono (CO)	Promedio de 8 horas	10 mg/m³
Monóxido de Carbono (CO)	Promedio de 1 hora	30 mg/m³

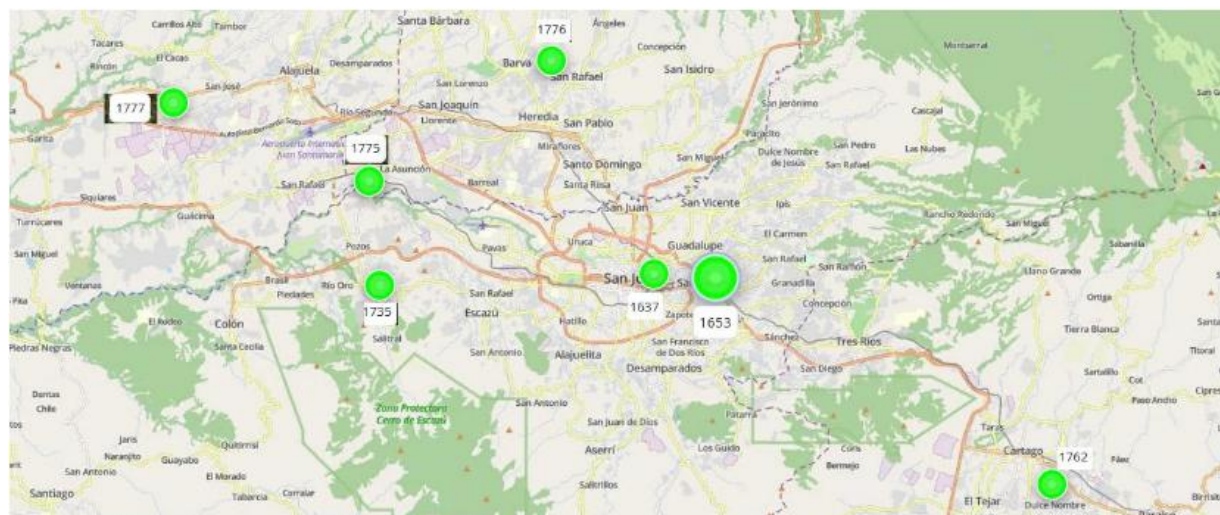
Escala del Índice Costarricense de Calidad del Aire (ICCA)

ICCA	Color	PM10 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	CO (ppm)	NO ₂ (ppm)	O ₃ (ppm)	SO ₂ (ppm)
0–20	Verde	0–60	0–15	0–5.50	0–0.105	0–0.055	0–0.065
21–40	Amarillo	61–100	15.1–40	5.51–11.0	0.106–0.210	0.056–0.110	0.066–0.130
41–60	Anaranjado	101–200	40.1–65	11.01–16.5	0.211–0.315	0.111–0.165	0.131–0.195
61–80	Rojo	201–250	66–100	16.51–22.0	0.316–0.420	0.166–0.220	0.196–0.260
81–100	Púrpura	>250	>100	>22.0	>0.420	>0.220	>0.260

Cada rango ICCA tiene asociada una recomendación de acción para la salud humana.

Red de estaciones IMN calidad del aire

2024-2026



Metodología y Red de Estaciones

- **Mediciones cada 15 segundos; promedios a 15 min, 1 h, 8 h y 24 h.**
- Cálculo de **percentiles 98 y 99** para identificar episodios de contaminación elevada.
- Comparación con la normativa CR (Decreto 39951-S) y guías OMS.
- Análisis de patrones meteorológicos: NAO y AO (transporte de polvo del Sahara).
- Estaciones de monitoreo (GAM):
 - – Fabio Baudrit, UCR (84187 / 1777)
 - – CTP-Belén (84199 / 1775)
 - – Municipalidad de Santa Ana (84303 / 1735)
 - – Núcleo experimental UNA – Santa Lucía, Heredia (84243 / 1776)
 - – San José – IMN (84141 / 1637)
 - – CIGEFI-UCR, San Pedro (84139 / 1653)
 - – TEC Cartago (73123 / 1762)
 - – Estación adicional de la Municipalidad de Liberia: (incorporada en septiembre 2025).
- **Comparación adicional con estaciones patrón/oficiales: RECOPE La Garita, HE-01 UNA Heredia, SJ-06 Ministerio de Salud, BE-01 La Ribera y SJ-04 La Uruca.**

Febrero 2025 — Resultados Clave

- Predominio de los colores verde y amarillo; mayor contaminación en la segunda quincena.
- PM_{2.5} superó 30 µg/m³ en días específicos, ligado a incendios forestales y tráfico vehicular.
- Belén-CTP (1775): ICCA > 50 e incluso > 70 entre el 9-11, 17-22 y finales de mes; ≥ 12 días sobre la norma.
- San José-IMN registró picos elevados los días 2, 6 y 7 (ICCA > 55), por factores locales.
- CIGEFI-UCR mostró deterioro al final del mes (calima por incendios).
- NO₂ > 90 µg/m³ entre el 24-26 feb al oeste del Valle Central (Alajuela, Belén).
- NAO y AO con fase mixta; no se evidenció arribo significativo de polvo del Sahara.
- Fabio Baudrit estuvo en mantenimiento durante todo el mes.

Marzo 2025 — Resultados Clave

- Predominio verde-amarillo con varios días en naranja y rojo.
- $\text{PM}_{2.5} > 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los días 13, 16, 20 y 26 (pirotecnia, incendios, tráfico).
- Erupción del Volcán Poás: días 13, 17 y 30 con $\text{PM}_{10} > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ICCA > 80).
- Estaciones más afectadas: Fabio Baudrit, Belén-CTP y TEC Cartago.
- $\text{NO}_2 > 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los días 13 y 24 al oeste del Valle Central.
- O_3 mantuvo valores 60–80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con menor dispersión a partir del 19.
- AO/NAO negativas al inicio del mes, positivas después del 12.
- Aumento de puntos cálidos respecto a febrero (atmósfera más seca).

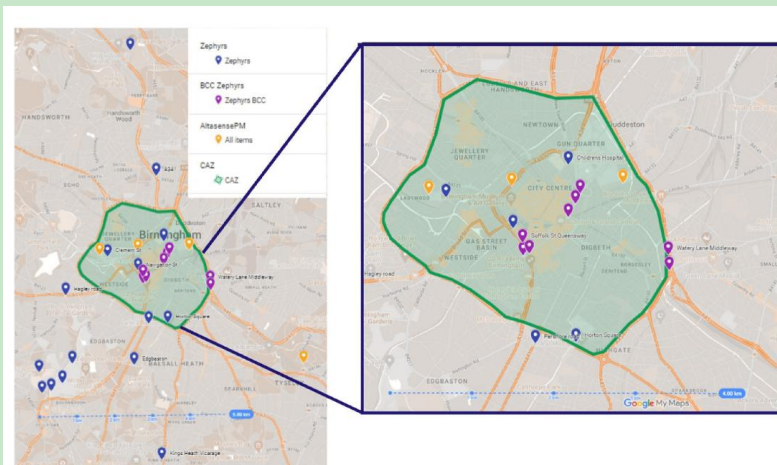
Abril 2025 — Resultados Clave

- Primera quincena estable; deterioro notable después del 21 de abril.
- Erupciones del Volcán Poás (21-23 abril): columnas de ceniza de 2 000 a 4 000 m.
- PM10 > 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Alajuela y Santa Ana entre el 21-23.
- Fabio Baudrit registró picos cercanos a ICCA 80 en la última semana.
- NO₂ con picos los días 9 y 30 (> 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Ozono O₃ se mantuvo dentro de rangos normales ($\approx$ 60-90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- NAO/AO positivas durante todo el mes — sin transporte significativo de polvo del Sahara.
- Influencia mixta de fuentes antropogénicas y naturales (volcánicas).

Septiembre 2025 — Resultados Clave

- Mes con la mejor calidad del aire del 2025; predominio del color VERDE.
- Lluvias persistentes favorecieron la dispersión y deposición de contaminantes.
- PM_{2.5} generalmente < 20 µg/m³; pico el 16-17 sep en Santa Ana (~70 µg/m³) y Belén-CTP (ICCA rojo, > 40).
- PM₁₀ > 80 µg/m³ los días 16-17 — posible influencia de polvo del Sahara.
- NO₂ con picos cerca de 150 µg/m³ los días 14, 25 y 26 (Santa Ana, Belén).
- O₃ con señal diurna marcada (10 am – 4 pm) en TEC Cartago y Belén.
- Incorporación de la estación de Liberia para ampliar la cobertura nacional.
- NAO negativa la mayor parte del mes; sin grandes arribos de polvo.

Sensores comparación



Location	Sensor or regulatory instrument	PM _{2.5} concentration 5th–95th percentile range ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Mean PM _{2.5} concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Watery Lane	Sensor	2.48–24.02	9.88
Navigation St	Sensor	1.65–20.88	8.31
Holloway Head	Sensor	0.89–20.53	7.74
Holloway Circus	Sensor	1.25–18.1	7.2
Geog Building	Sensor	1.27–19.09	7.16
Children's Hospital	Sensor	1.32–17.91	7.1
Albert St	Sensor	1.85–20.49	8.51
A34	Sensor	1.12–20.19	7.68
A4540	Regulatory	2.55–23.76	9.06
Ladywood	Regulatory	1.78–21.34	7.8

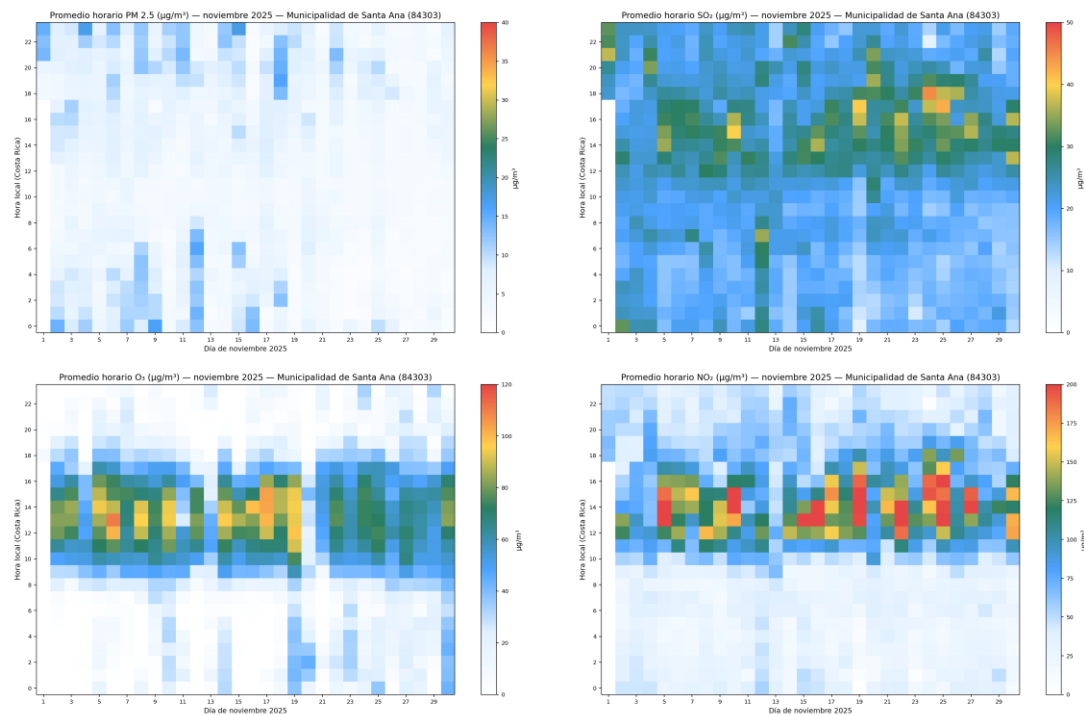
Note: The two regulatory DEFRA AURN sites were chosen because they fall into the $\sim 39 \text{ km}^2$ area covered by the sensor network. One other regulatory station in the Birmingham area (Acocks Green) was not used as this is $>2 \text{ km}$ away from the nearest sensor and is not considered a city centre location.

Comparación Mensual — Resumen

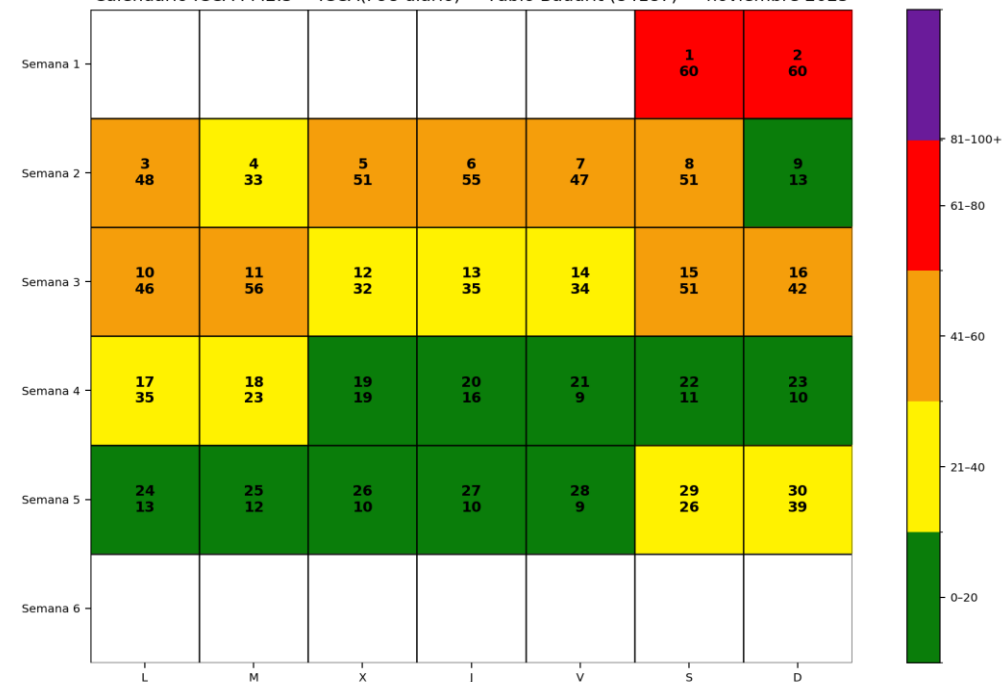
Mes	ICCA Dominante	Eventos Clave	Estaciones más Afectadas	Influencia Meteorológica
Febrero	Verde / Amarillo	Tráfico, incendios	Belén-CTP, San José	NAO mixta, sin polvo Sahara
Marzo	Amarillo / Naranja	Erupción Poás, incendios, pirotecnia	Fabio Baudrit, Belén, TEC	NAO/AO variables
Abril	Amarillo, picos Naranja / Rojo	Erupciones Poás (21-23)	Fabio Baudrit, Santa Ana, Cartago	NAO/AO positivas
Septiembre	Verde	Polvo del Sahara (16-17), tráfico	Santa Ana, Belén	NAO negativa, lluvias

Ciclo diario NO₂ y O₃ — estaciones Zephyr

Ejemplo complementario para analizar patrones horarios por contaminante



Calendario ICCA PM2.5 = ICCA(P98 diario) — Fabio Baudrit (84187) — noviembre 2025

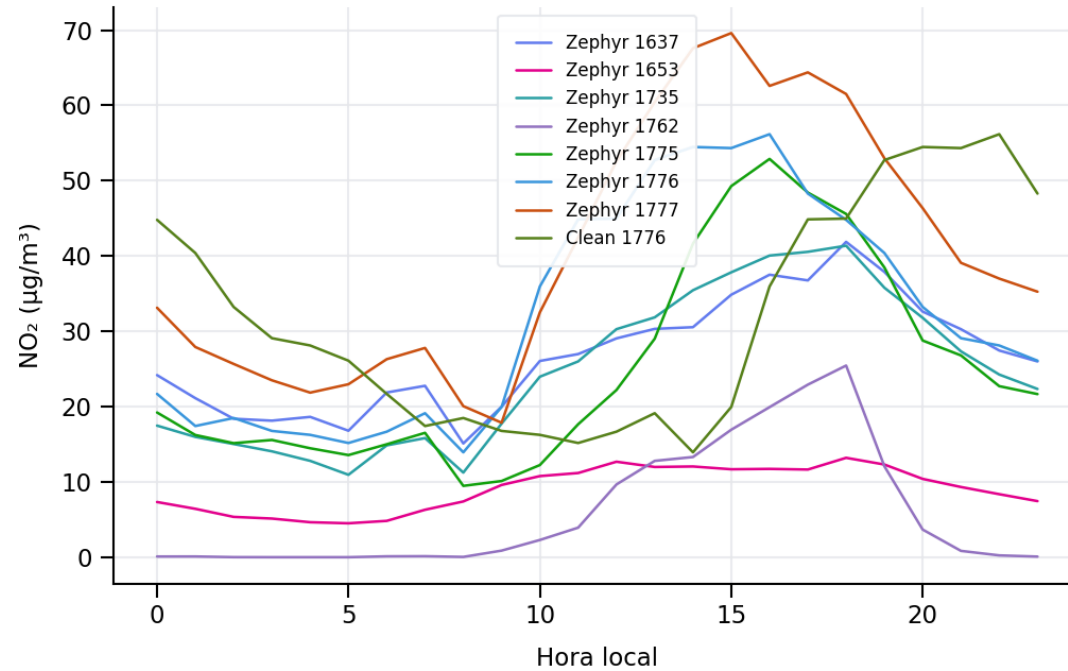


- NO₂ concentra máximos durante horas de actividad vehicular y condiciones de menor dispersión.
- O₃ muestra comportamiento fotoquímico con valores elevados durante el día y descenso nocturno.

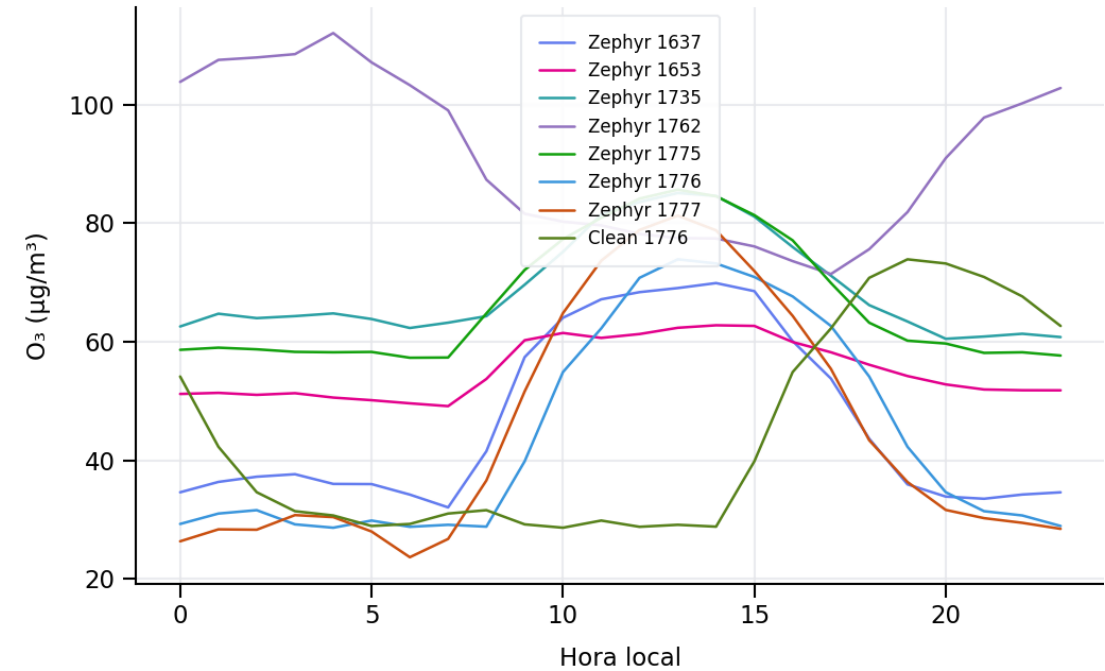
Ciclo diario NO₂ y O₃ — estaciones Zephyr

Ejemplo complementario para analizar patrones horarios por contaminante

Ciclo diario promedio NO₂ - Dic 2024



Ciclo diario promedio O₃ - Dic 2024

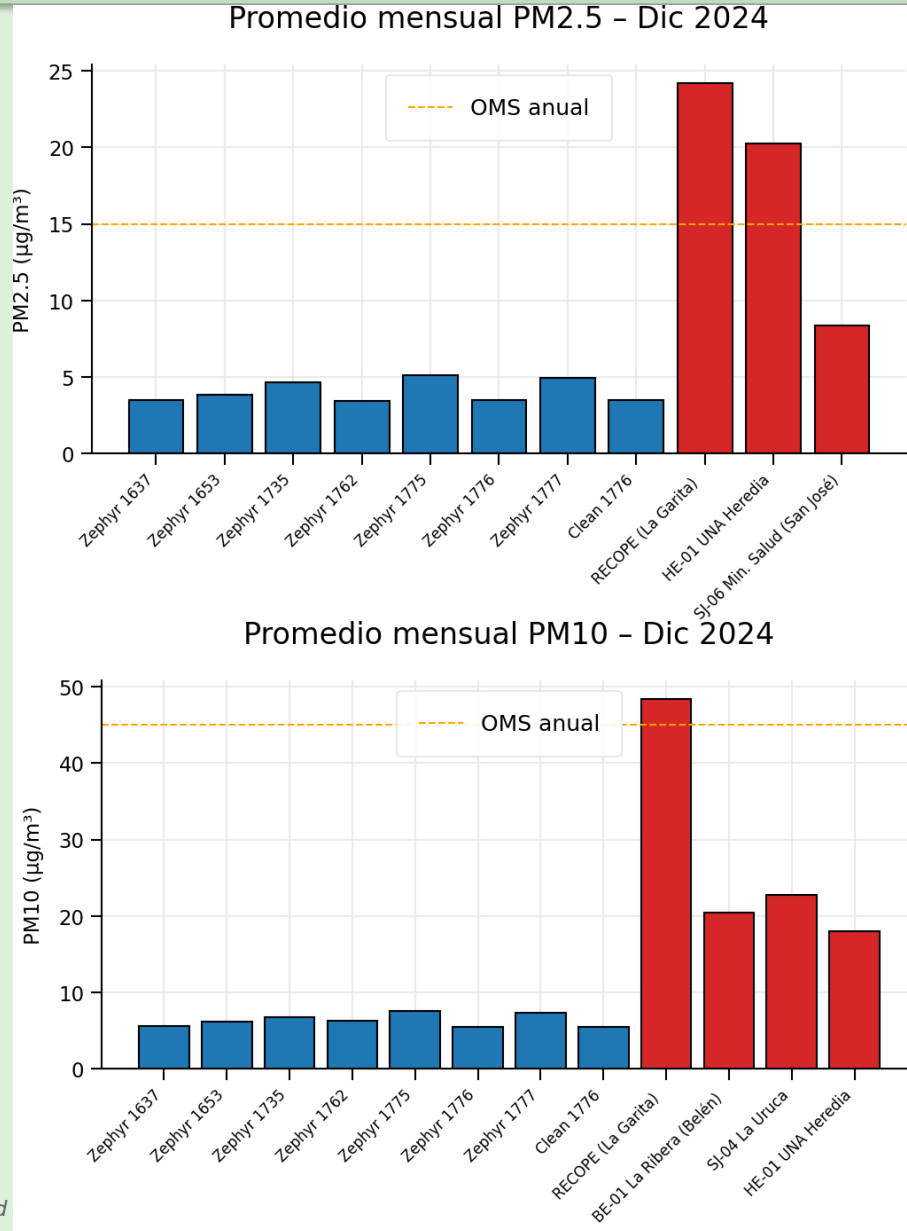


- NO₂ concentra máximos durante horas de actividad vehicular y condiciones de menor dispersión.
- O₃ muestra comportamiento fotoquímico con valores elevados durante el día y descenso nocturno.

Análisis Integrado 2025

- **Factores antropogénicos:** tráfico vehicular intenso (10 am – 4 pm) genera picos de NO₂ y PM en Santa Ana, Belén y Alajuela.
- **Factores naturales:** Volcán Poás (marzo-abril) y polvo del Sahara (septiembre) son los principales forzadores externos.
- **Patrón espacial:** el oeste del Valle Central (Belén, Santa Ana, Alajuela) es la zona más impactada.
- **Patrón estacional:** meses secos (feb-abr) presentan más episodios desfavorables; época lluviosa (sept) mejora significativamente la calidad.
- **Belén-CTP** es la estación con mayor recurrencia de episodios sobre la norma — punto crítico de monitoreo.
- Estaciones de Cigefi, San José y Santa Lucía mantienen calidad **mayormente buena**.
- Se evidencia la necesidad de fortalecer sistemas integrados de alerta temprana (meteo + volcánico + calidad del aire).

Promedio mensual PM2.5 / PM10 — Zephyr vs Minsalud



- PM2.5 mensual: Zephyr 3.5–5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; MINSALUD RECOPE 24.2, HE-01 UNA 20.2, SJ-06 8.4 — diferencia $\sim 5\times$ **indica subestimación sistemática de la media por sensores ópticos a bajas concentraciones.**

- PM10 mensual: Zephyr 5.5–7.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vs MINSALUD 18–48 — el sesgo es aún mayor.

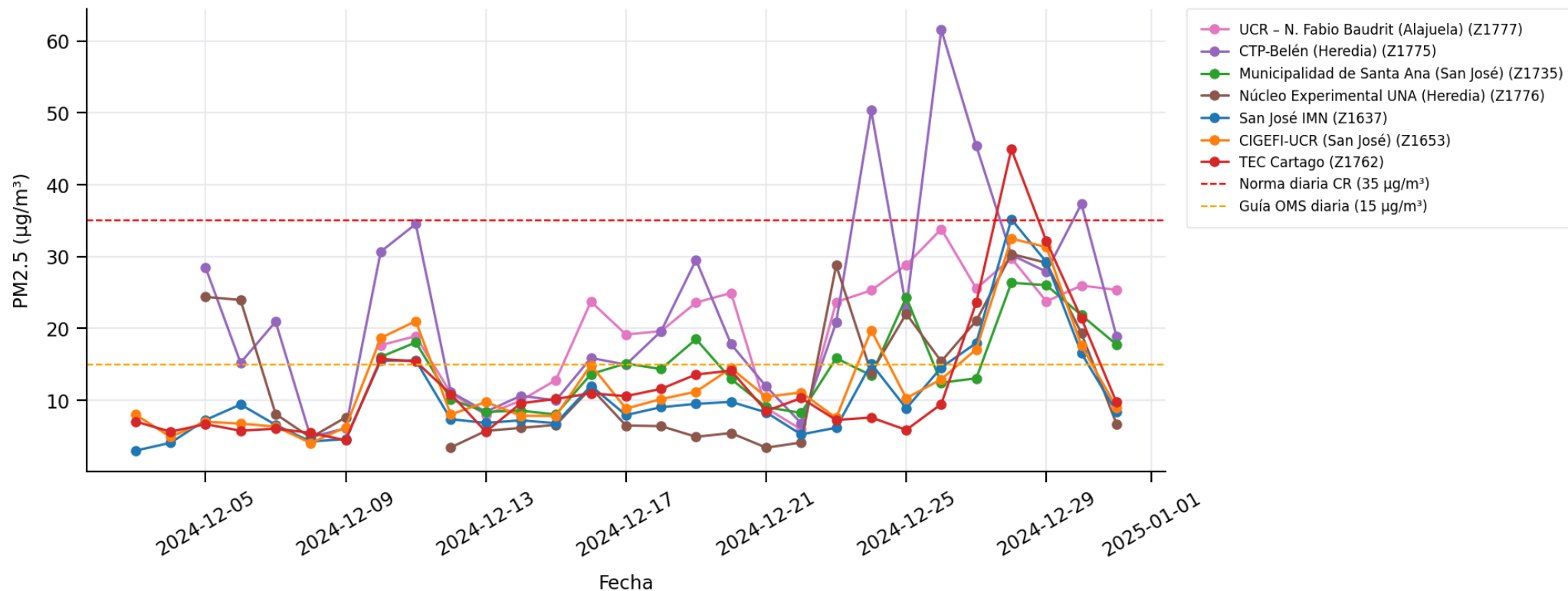
- Los Zephyr capturan bien la VARIABILIDAD (P99, ciclo diario) pero NO la MAGNITUD ABSOLUTA media $\rightarrow$ requieren corrección de offset/escala antes de uso normativo.

- Estas brechas son la justificación cuantitativa de los ajustes posteriores (factores multiplicativos por estación) aplicados en versiones siguientes del informe.

Serie diaria P99 de PM2.5 por estación

Diciembre 2024: evolución temporal y episodios puntuales

Promedio diario percentil 99 de PM2.5 por estación — Diciembre 2024



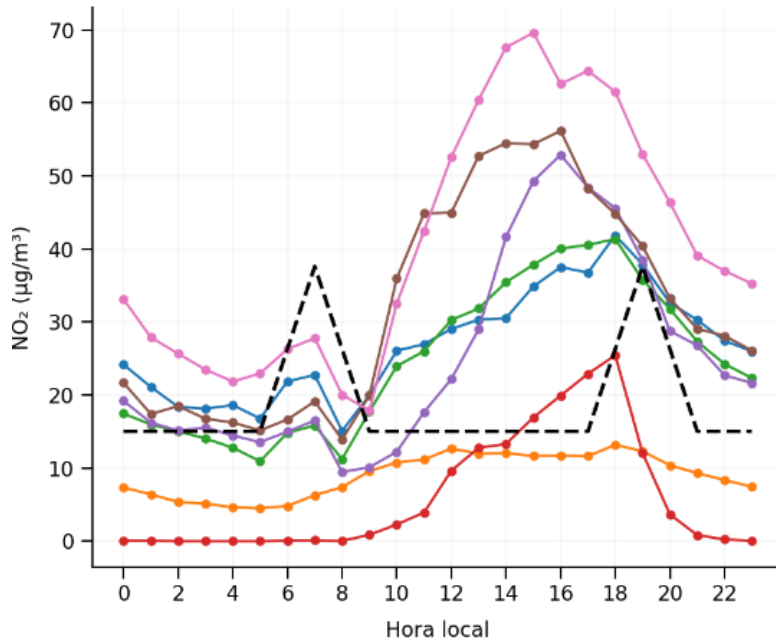
- Los episodios más altos se concentran en la segunda mitad del mes, especialmente alrededor del 24–29 de diciembre.
- La comparación simultánea facilita identificar estaciones críticas y duración de los episodios.

Azul Verde Amarillo Rosa/Coral Lavanda Crema

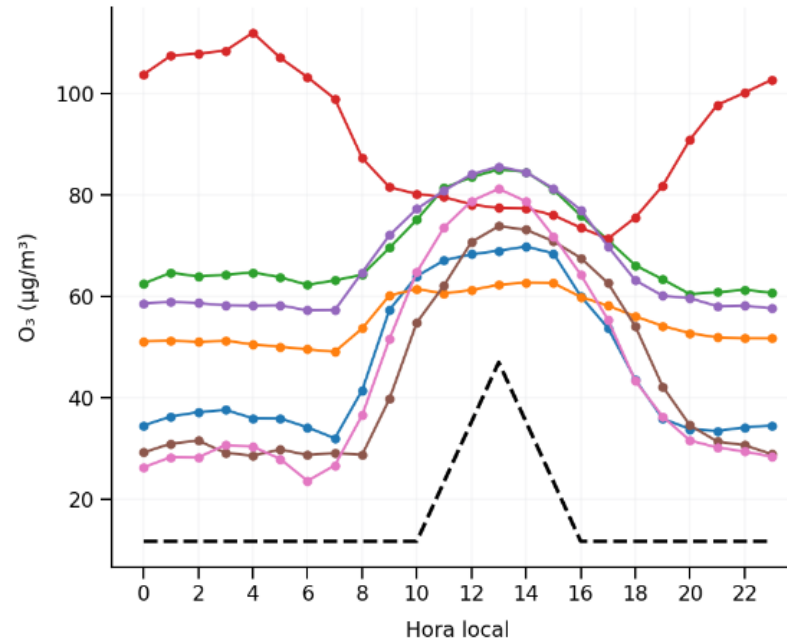
Ciclo diario de gases — comparación con patrón

Diciembre 2024: variabilidad horaria de NO₂, O₃ y SO₂

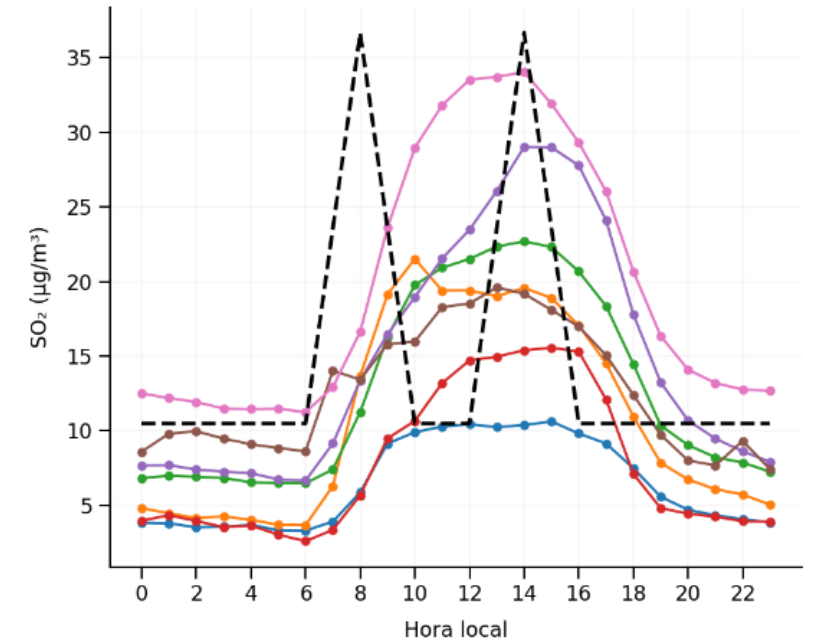
Ciclo diario promedio de NO₂ — Diciembre 2024



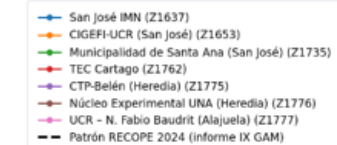
Ciclo diario promedio de O₃ — Diciembre 2024



Ciclo diario promedio de SO₂ — Diciembre 2024



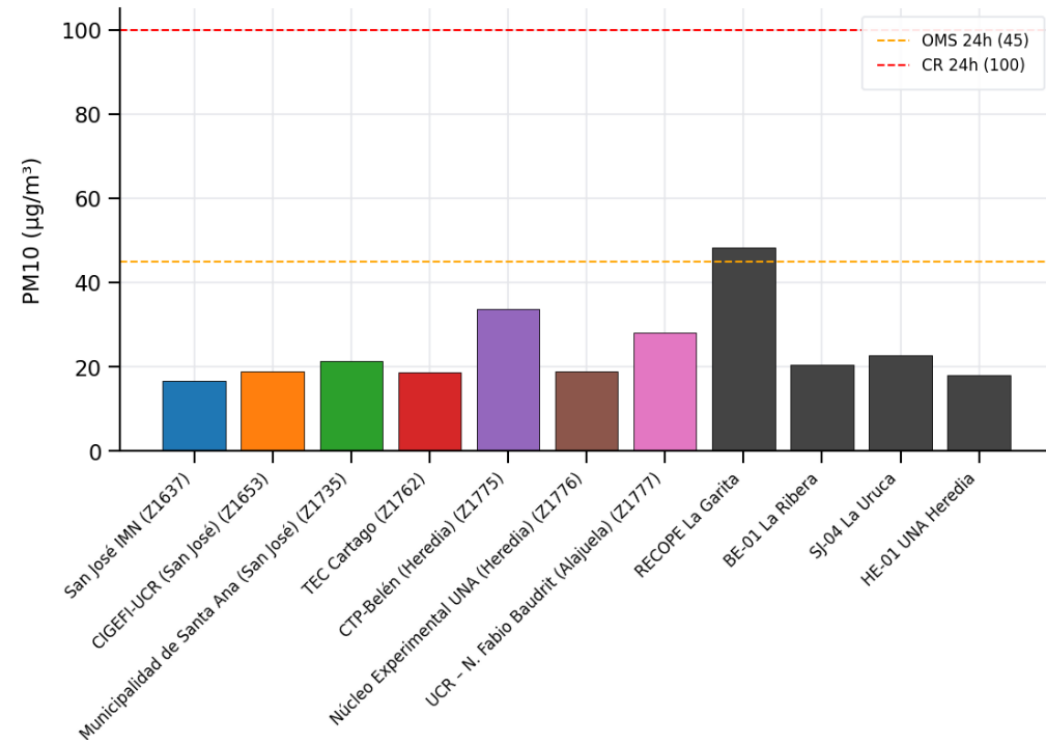
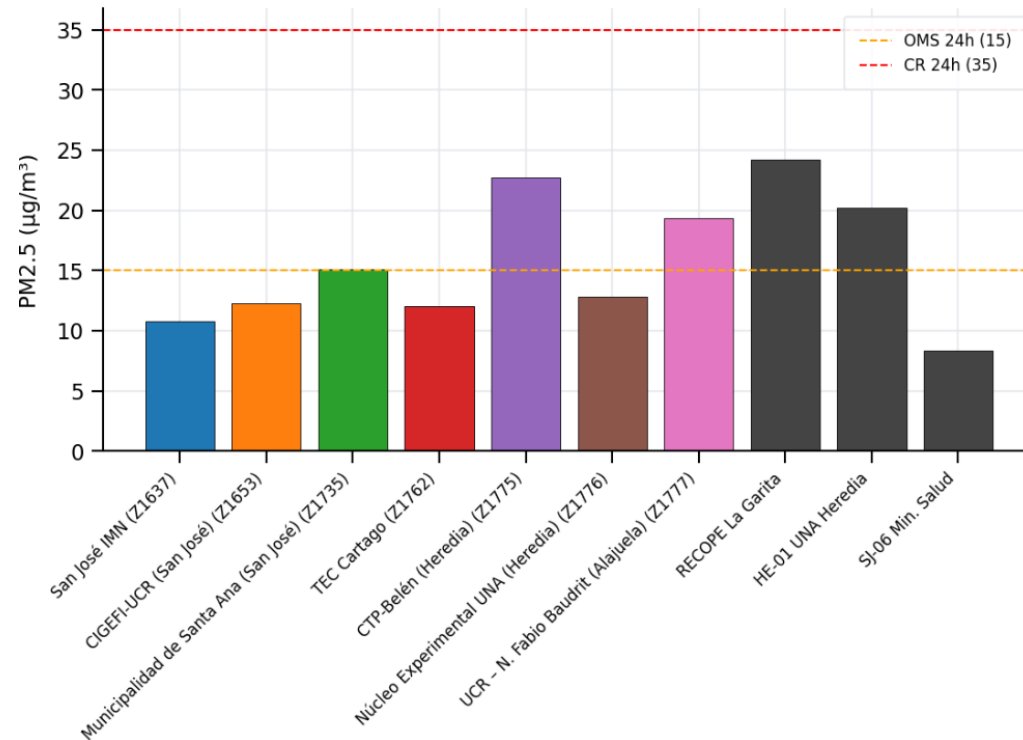
- Se observa ciclo diurno marcado en O₃ y máximos vespertinos de NO₂ en estaciones urbanas.
- La línea discontinua permite contrastar cada estación con el comportamiento patrón RECOPE 2024.



Material particulado P99 — Zephyr vs oficiales

PM2.5 y PM10: comparación con guías OMS y norma nacional

PM2.5 — Promedio diario P99 (Red Zephyr) vs estaciones oficiales PM10 — Promedio diario P99 (Red Zephyr) vs estaciones oficiales

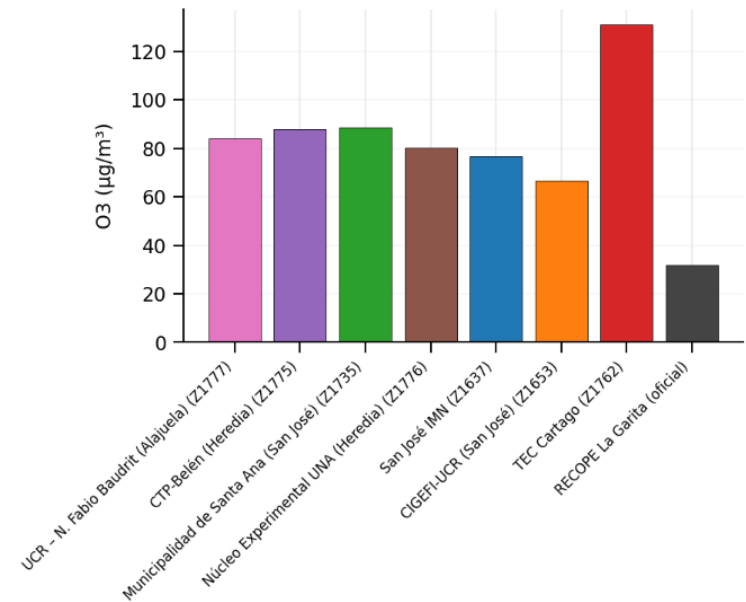
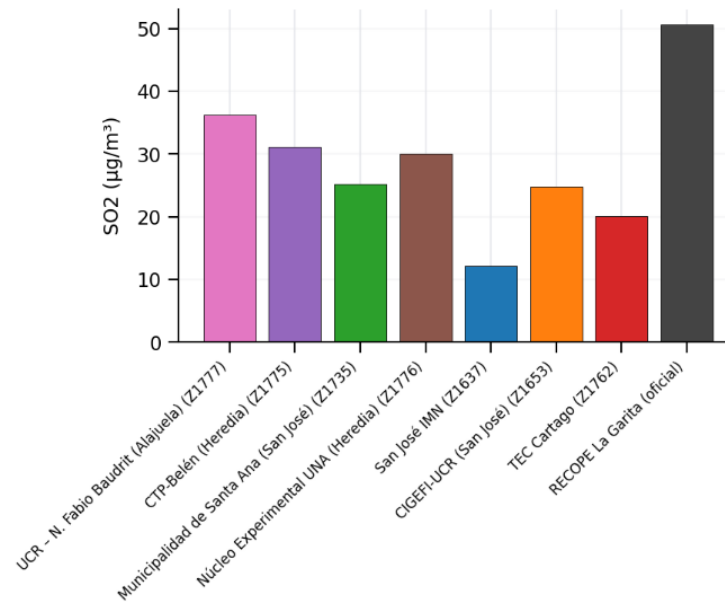
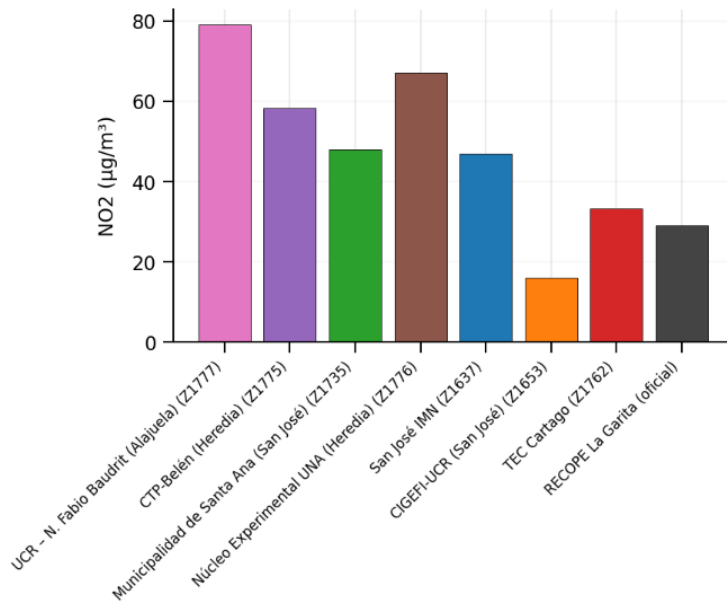


- PM2.5 excede la guía OMS de 24 h en varias estaciones, aunque permanece bajo el umbral nacional en la mayoría.
- PM10 presenta contraste claro frente a estaciones oficiales y mantiene margen respecto a la norma nacional.

Análisis comparativo P99 — gases vs RECOPE

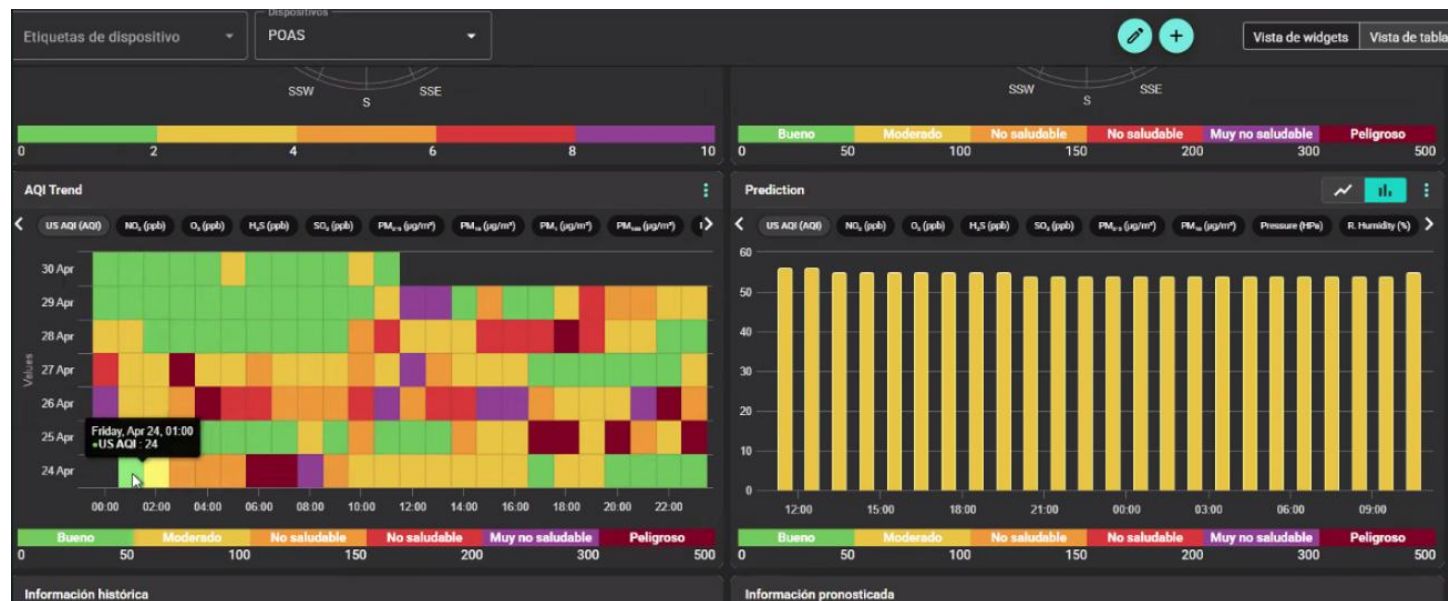
NO₂, SO₂ y O₃: Red Zephyr frente a estación patrón oficial

NO₂ — Promedio diario P99 (Red Zephyr) vs RECOPE SO₂ — Promedio diario P99 (Red Zephyr) vs RECOPE O₃ — Promedio diario P99 (Red Zephyr) vs RECOPE



- P99 diario permite comparar eventos extremos entre sensores Zephyr y el patrón RECOPE.
- O₃ y NO₂ muestran diferencias espaciales importantes; SO₂ destaca el contraste con La Garita.

Estación Poás-Grecia



Estaciones de bajo costo orientadas a medir particulado, pluma del volcán.

Estaciones comparativos

Tipos de estaciones de calidad del aire — comparación operativa

Costo vs precisión vs validez legal

Muy low-cost, low-cost y regulatorias: por qué unas sí y otras no

Aspecto	Muy low-cost	Low-cost	Regulatorias
Costo aprox.	US\$100–1,500	US\$2,000–15,000	US\$30,000–100,000+
Tecnología	Sensores ópticos y electroquímicos básicos	Sensores mejor integrados, telemetría y correcciones	Métodos de referencia o equivalentes con trazabilidad
Sí sirven para...	Educación, ciencia ciudadana, tamizaje y alertas comunitarias	Redes densas, “hotspots”, investigación y complemento de la red oficial	Cumplimiento normativo, alertas oficiales, inventarios y decisiones regulatorias
No sustituyen...	Una estación patrón ni una decisión legal	Una estación regulatoria por sí sola	Una red densa de bajo presupuesto
Fortalezas	Muy accesibles y fáciles de desplegar	Mejor balance costo–beneficio y mayor cobertura espacial	Mayor precisión, comparabilidad y respaldo técnico–legal
Limitaciones	Más deriva, más ruido y mayor sensibilidad a humedad y temperatura	Requieren colocalización, calibración y QA/QC continuo	Mayor costo, infraestructura, energía y mantenimiento
Veredicto	Útiles si se interpretan con cautela	La mejor opción para ampliar cobertura con control de calidad	Imprescindibles como referencia y validación oficial

Pronóstico de calidad del aire

ICCA	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción de la calidad del aire	Buena	Desfavorable para grupos sensibles	Desfavorable	Muy desfavorable	Peligrosa

Fig.2 Escala del índice de Calidad del aire según reglamento de contaminantes criterio.

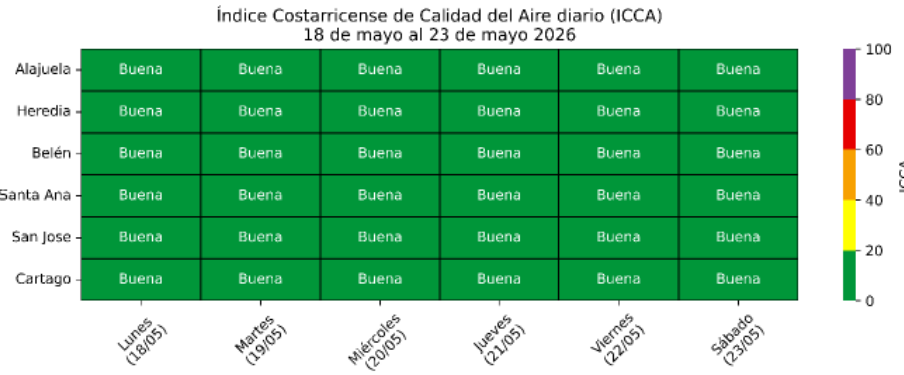
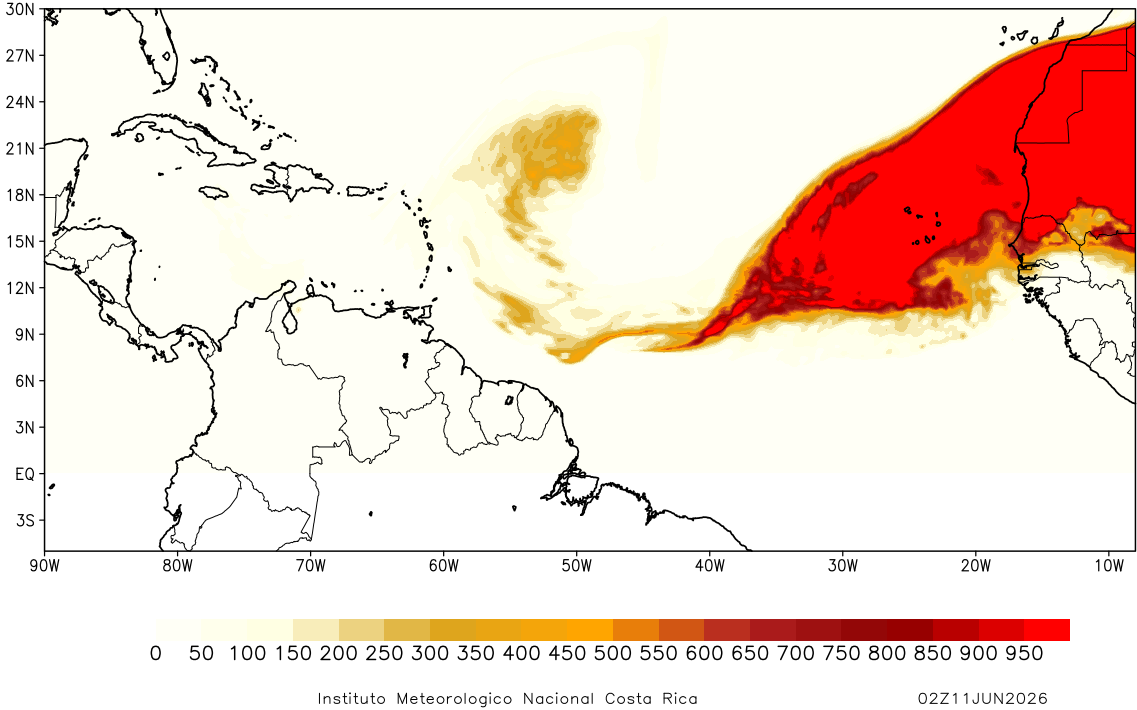


Fig. 3. Pronóstico del valor máximo diario del índice Costarricense de Calidad del aire para los próximos 6 días (18-23de mayo de 2026)

IMN: Columna de polvo (mg/m2)



Índice de Calidad del aire con base al reglamento de contaminantes criterio.

Conclusiones y Recomendaciones

- **Belén-CTP es la estación más vulnerable:** episodios reiterados desfavorables a muy desfavorables.
- Las **erupciones del Volcán Poás** (marzo-abril) **constituyen el principal forzador** externo en 2025.
- PM2.5 superó el límite normativo de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en días puntuales (incumplimiento de la norma nacional).
- Se recomienda mantener un monitoreo continuo y combinado: **meteorológico + volcánico + calidad del aire.**
- Comunicar el riesgo a poblaciones vulnerables (niños, adultos mayores, asmáticos) en días desfavorables.
- Adoptar progresivamente las guías OMS más estrictas: PM2.5 anual $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Ampliar la red nacional de estaciones (Liberia ya incorporada en septiembre 2025).
- Fomentar movilidad sostenible y control de emisiones industriales y agrícolas.

Referencias

- Brook, R. D., et al. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
- Calderón-Garcidueñas, L., et al. (2015). Air pollution, cognitive deficits and brain abnormalities. *Brain and Cognition*, 77(3), 345-355.
- EPA (2019). Health effects of air pollution.
- García, R., & López, M. (2020). Contaminación atmosférica y sus efectos en la salud.
- IPCC (2022). Climate change and its impact on global health.
- Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes. *Nature*, 249, 810-812.
- OMS (2021). Air pollution and health.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Decreto Ejecutivo No. 39951-S — Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio, Costa Rica.
- Datos primarios: Red de Monitoreo IMN (Febrero, Marzo, Abril y Septiembre 2025).