

Análisis del impacto de un incendio rural sobre la calidad del aire regional mediante WRF-Chem

Analysis of the impact of a wildfire in Eastern Córdoba Province on regional air quality by WRF-Chem

Doctorando:

Eduardo LÓPEZ

<https://orcid.org/0000-0002-3381-185X>

Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Córdoba (FRC), Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental (CIQA), Argentina
elopez@ciqa.com.ar

Director:

Roberto PEPINO MINETTI

Codirector:

S. Enrique PULIAFITO

Resumen

Los incendios en la provincia de Córdoba constituyen eventos severos de emisión de contaminantes atmosféricos comprometiendo la calidad del aire regional. El presente trabajo evalúa el impacto de un incendio de agosto de 2025 en el este provincial. El área quemada fue delimitada integrando sensores remotos (MODIS, GOES-19 y Sentinel-2P) y la dispersión de los contaminantes, utilizando al monóxido de carbono (CO) como contaminante trazador, se simuló mediante el modelo WRF-Chem. Este reprodujo aceptablemente la dinámica atmosférica ($r \sim 0,4$) con un sesgo del 27%, adecuado para un diagnóstico exploratorio. Los resultados indicaron que la pluma se extendió hacia el oeste perturbando la calidad del aire regional, afectando a los departamentos de Río Primero, Colón y Capital. En localidades rurales sobre la trayectoria directa de la pluma, los picos horarios de CO variaron entre 0,21 y 0,60 ppm, representando incrementos de hasta 567% sobre el nivel de fondo (0,08 - 0,09 ppm). En Córdoba Capital, si bien no alteró el promedio (0,24 ppm), la pluma amplió la exposición acumulada diaria. Se concluye que la modelación resultó una herramienta clave en la gestión del riesgo atmosférico regional.

Palabras clave: Incendios forestales; Calidad del aire; WRF-Chem; Producto satelital; Córdoba.

Abstract

Wildfires in the province of Córdoba constitute severe events of atmospheric pollutant emissions, compromising regional air quality. This study evaluates the impact of an August 2025 wildfire in the eastern part of the province. The burned area was delineated by integrating remote sensing data (MODIS, GOES-19, and Sentinel-2P), and pollutant dispersion—using carbon monoxide (CO) as a tracer—was simulated using the WRF-Chem model. The model acceptably reproduced atmospheric dynamics ($r \sim 0,4$) with a 27% bias, which is adequate for an exploratory diagnosis. Results indicated that the plume extended westward, disturbing regional air quality and affecting the departments of Río Primero, Colón, and Capital. In rural locations along the direct trajectory of the plume, hourly CO peaks ranged between 0.21 and 0.60 ppm, representing increases of up to 567% over background levels (0.08–0.09 ppm). In Córdoba City, although the average concentration was not altered (0.24 ppm), the plume broadened daily cumulative exposure. It is concluded that modeling proved to be a key tool for regional atmospheric risk management.

Keywords: Wildfire; Air Quality; WRF-Chem; Remote sensing; Córdoba.

Introducción

El cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de los incendios forestales a nivel global como consecuencia del aumento de temperaturas, mayor cantidad de días consecutivos sin lluvias y períodos más frecuentes de sequías prolongadas (Mateos et al., 2019). Los incendios constituyen fuentes severas de emisión de contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono (CO) y material particulado fino (PM_{2,5}), los cuales son transportados regionalmente reaccionando químicamente en su recorrido hasta su deposición (Mateos et al., 2019). Por lo tanto, más allá del daño directo sobre los ecosistemas locales, los incendios ejercen un impacto de corto y mediano plazo al afectar la calidad del aire regional, incrementando los riesgos de afecciones respiratorias y cardiovasculares en poblaciones distantes del foco ígneo (WHO, 2024).

En la provincia de Córdoba, los eventos de quema presentan una severidad crítica, ocurriendo principalmente entre los meses de julio y octubre. Durante este período la combinación de biomasa seca (producto de la estación fría) e intensos vientos favorece la propagación del fuego en áreas forestales, rurales y de interfaz agrícola-forestal. Tan solo en 2024, la provincia registró 586 incendios que afectaron más de 100.000 hectáreas, lo que lo convierte en el segundo año con mayor superficie quemada en la última década, superado sólo por el récord de 2020 con 340.000 hectáreas (SGRCCyPC e IDECOR, 2026). Pese a la magnitud del problema, la evaluación cuantitativa de estos impactos sobre la calidad del aire enfrenta una limitación estructural debido a la escasez de una red de monitoreo continuo con cobertura representativa de la extensión provincial (Mateos et al., 2019). Frente a esta limitación, los modelos de transporte químico acoplados surgen como una herramienta complementaria para la gestión ambiental. Entre ellos, el modelo WRF-Chem (Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry) es ampliamente utilizado en la literatura, ya que permite simular la meteorología local y los procesos fisicoquímicos de los contaminantes de forma simultánea y retroalimentada (Kumar et al., 2012). Asimismo, la integración de productos satelitales derivados de sensores remotos permite validar la extensión espacial de las áreas quemadas.

En este marco, el presente trabajo evalúa el impacto sobre la calidad del aire generado por un incendio en una zona rural al este provincial. A través del modelado numérico con WRF-Chem y su cotejo con datos satelitales, se cuantifican las variaciones en las concentraciones de CO utilizado como contaminante trazador aportando un diagnóstico exploratorio esencial para la gestión del riesgo atmosférico en la región.

Desarrollo

Área de estudio y red observacional de calidad del aire

La provincia de Córdoba presenta heterogeneidad espacial en sus emisiones. La capital concentra las principales fuentes antrópicas asociadas al tráfico vehicular e industrias, predominando de CO y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Pepino Minetti et al., 2020). En contraposición, el interior provincial exhibe dinámicas influenciadas por la actividad agropecuaria y la quema estacional de biomasa donde la emisión de compuestos orgánicos volátiles y la resuspensión de partículas promueven la formación de ozono troposférico (O₃) y episodios de contaminación regional. Pese a esta variabilidad, el monitoreo in situ de la calidad del aire en la provincia se encuentra centralizado en la ciudad capital. Las mediciones han sido llevadas a cabo por una estación de referencia homologada (tipo US-EPA) perteneciente al centro CIQA de la FRC-UTN (Pepino Minetti et al., 2020), ubicada en la intersección de Av. Gral. Paz y La Rioja. Dicha estación registró concentraciones de NO₂, CO, PM_{2,5} y O₃ entre septiembre de 2018 y octubre de 2025. Posteriormente, las mediciones se trasladaron al Observatorio Ambiental Municipal con una nueva estación homologada dependiente de la Secretaría de Ambiente. Adicionalmente, desde 2023 opera una red complementaria de aproximadamente diez sensores de bajo costo distribuidos en la ciudad, sin embargo, la disponibilidad pública de sus datos es aún limitada. Una situación similar ocurre en el interior provincial donde se han instalado sensores de bajo costo en determinados sitios, pero sin acceso público a la información generada.

Incendio en zona rural entre Devoto y La Francia

Como caso de estudio, se seleccionó un evento de quema registrado durante la primera semana de agosto de 2025 en un sector rural comprendido entre las localidades de La Francia y Devoto (departamento San Justo, al este de la provincia). El foco ígneo se inició tras el mediodía del 2 de agosto de 2025 y mantuvo su actividad principal durante el resto de la jornada, con guardias de cenizas y reigniciones hasta las primeras horas del 5 de agosto. El área afectada correspondió a una zona de bañados dentro de la jurisdicción de Devoto, situada a 20 km de San Francisco y a 200 km de la capital provincial. Dicha

topografía dificultó el acceso del personal de bomberos, aunque no generó daños materiales destacados por tratarse de un sector alejado de viviendas y ganado (Diario La Nueva Mañana, agosto 2025).

La caracterización espacial del incendio fue validada por observaciones de incrementos térmicos de la superficie (focos calientes) registradas por MODIS (espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) a bordo de los satélites Aqua y Terra, disponible operativamente en la plataforma FIRMS (Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos dependiente de la NASA (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/>)). Como se pueden presentar falsos positivos arrojados por aumentos de temperatura en el infrarrojo sin estar asociados a quemaduras efectivas, de manera complementaria, se empleó el producto operacional FDCF (Fire Detection and Characterization) derivado del sensor ABI a bordo del satélite GOES-19, disponible en el repositorio abierto de NOAA (NOAA, 2024). Este producto cuantifica la energía radiada por el incendio analizando las radiancias y los incrementos de temperatura de brillo entre las bandas del infrarrojo medio ($3.9\ \mu\text{m}$) y del infrarrojo térmico ($11\ \mu\text{m}$). Este filtrado permite identificar píxeles de quema activa descartando falsos positivos. La cicatriz de quemado y la delimitación del área afectada fueron verificadas mediante el índice BAIS2 (Burned Area Index for Sentinel-2) procesado sobre imágenes ópticas multiespectrales capturadas el 8 de agosto de 2025 (fecha posterior a la extinción del incendio) por el satélite Sentinel-2P, obtenidas a través de Copernicus Browser (ESA, 2025).

Configuración del modelo químico WRF-Chem y análisis de la bondad de ajuste

La dispersión atmosférica de los contaminantes y la evolución tridimensional de la pluma de emisión se simuló mediante el modelo químico-meteorológico WRF-Chem. Las simulaciones se ejecutaron para la primera quincena de agosto de 2025 sobre un dominio que abarcó la totalidad de la provincia de Córdoba y áreas adyacentes (véase dominio de la Figura 1), empleando una grilla de 120×120 cuadros con una resolución espacial de 6 km por píxel. Debido a la alta demanda computacional, las mismas fueron llevadas a cabo en un entorno de alto rendimiento dentro del centro de cómputos del Laboratorio Hidrometeorológico de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. El modelado incorporó inventarios de emisiones antropogénicas, biogénicas y de quema de biomasa, además de condiciones de contorno para estimar adecuadamente tanto las concentraciones de fondo de gran escala como las influencias locales del incendio sobre el contaminante trazador (CO).

Parámetro	Configuración del modelo
Condiciones de contorno meteorológicas	Reanálisis atmosférico de 5ta generación (ERA5)
Condiciones de contorno química	WACCM
Resolución	6 km (horizontal) x 50 niveles verticales (hasta 50 hPa)
Microfísica	Esquema de Thompson
Radiación onda larga	Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG)
Radiación onda corta	Godart
Capa superficial	Monin-Obukhov (MM5 revisado)
Superficie del suelo	Unified Noah land-surface model
Capa límite	Mellow-Yamada-Janjic TKE scheme (MYJ)
Esquema químico	MOZART Chemistry and GOCART aerosols (MOZCART) using KPP library
Inventario de emisiones antropogénicas	EDGAR-GEAA (Puliafito et al., 2020)
Inventario de emisiones biogénicas	MEGAN 2.0 ONLINE
Inventario de quema de biomasa	FINN
Fotólisis	Fast-J
Modelo de aerosoles	GOCART dust emission

Tabla 1 - Configuración del modelo WRF-Chem.

Para evaluar el desempeño del modelo, las concentraciones simuladas se contrastaron con las únicas mediciones en terreno disponibles en Córdoba capital, empleando indicadores estadísticos estándar ampliamente reconocidos (Kumar et al., 2012) como el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación de Pearson (r). Ante la ausencia de estaciones de monitoreo cercanas al origen del incendio, no fue posible validar cuantitativamente las concentraciones in situ en dicho sector.

Resultados

Detección del incendio mediante sensado remoto

La detección inicial mediante el sensor MODIS, permitió identificar el inicio de la ignición tras el mediodía del 2 de agosto de 2025. Los datos del producto FDCF (GOES-19) confirmaron la presencia de anomalías térmicas correspondientes a fuego activo en la zona de estudio, registrando valores significativos de radiancia en el infrarrojo con mayor intensidad durante el resto de la jornada (Figura 1). El seguimiento del incendio permitió confirmar la persistencia de focos secundarios de menor emisión y guardias de cenizas hasta las primeras horas del 5 de agosto. Debido a la cobertura de nubes densa durante los días de quema, no se pudo confirmar la dirección exacta de la pluma durante las horas del incendio mediante imagen satelital. Sin embargo, se logró identificar el área afectada delimitando con precisión la cicatriz de quemado mediante el procesamiento del índice BAIS2 para una imagen correspondiente al 8 de agosto de 2025. El área detectada ascendió a 172 hectáreas con una pendiente media de 2,4 m. La cobertura se caracterizó por 36,6% matorral/arbustal, 35,3% vegetación leñosa, 16,4% pastura manejada, 5,8% cultivo, 4,4% monte y 1,5% otros de acuerdo a la clasificación de SGRCCyPC e IDECOR, 2026).

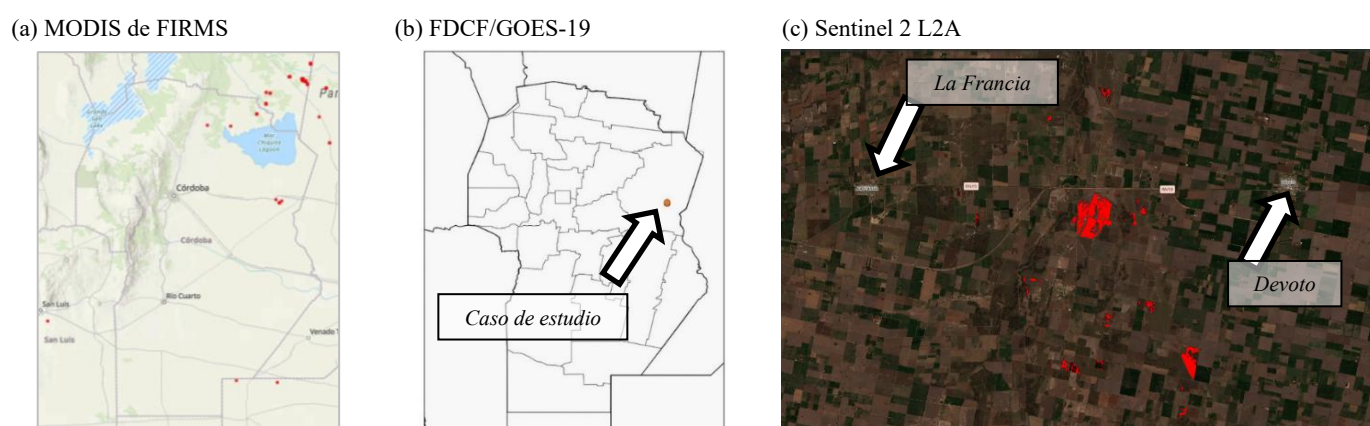


Figura 1 - Teledetección del incendio de Devoto mediante sensado remoto.

Evaluación del desempeño del modelo WRF-Chem

Las concentraciones horarias simuladas durante la primera quincena de agosto de 2025 mostraron una concordancia aceptable con los registros in situ de la estación de referencia de Córdoba capital como se muestra en la Tabla 2. El coeficiente de Pearson evidenció valores positivos en todos los contaminantes, capturando adecuadamente el ciclo diurno urbano y la variabilidad meteorológica regional, con errores (MAE y RMSE) dentro de los rangos reportados en la literatura (Kumar et al., 2012). La subestimación observada en NO₂ y CO (BIAS < 0) responde a un efecto de representatividad espacial ya que se compara un dato puntual de superficie (expuesto al alto tráfico vehicular y actividad comercial local) contra el promedio de una celda de grilla de 6 km. El sesgo relativo del CO representó aproximadamente un 27% respecto al promedio observado. No obstante, considerando que las concentraciones se mantuvieron holgadamente por debajo del límite guía de la OMS de 9 ppm para medias móviles de 8 h (WHO, 2021), dicho nivel de error resultó admisible para un estudio exploratorio. Por su parte, el O₃ fue sobreestimado, aunque registró la mejor correlación y el menor sesgo relativo. En conjunto, la configuración adoptada demostró capacidad representativa para reproducir la dinámica atmosférica regional para la evaluación del impacto potencial del incendio de Devoto sobre la calidad de aire regional.

Parámetro	NO ₂	CO	PM _{2,5}	O ₃
Promedio observado	23,8 ppb	0,576 ppm	23,9 ug/m ³	12,4 ppb
Máximo observado	63,2 ppb	2,66 ppm	111 ug/m ³	29,0 ppb
MAE	12 ppb	0,258 ppm	15,3 ug/m ³	6 ppb
RMSE	14 ppb	0,380 ppm	21,4 ug/m ³	7 ppb
BIAS	-11 ppb	-0,158 ppm	8,37 ug/m ³	1 ppb
r	0,40	0,34	0,43	0,46

Tabla 2 - Indicadores estadísticos para la primera quincena del mes de agosto de 2025 en Córdoba Capital.

Impacto del paso de la pluma en la calidad del aire regional

Una vez validado el campo químico, se evaluó el transporte advectivo de la pluma de CO generada por el incendio de Devoto y su impacto sobre localidades situadas a lo largo de la trayectoria de dispersión. El CO fue seleccionado como contaminante trazador debido a su estabilidad química relativa en la escala temporal del evento y su estrecha asociación a procesos de combustión incompleta como los que suceden en los incendios (Mateos et al., 2019). La simulación numérica permitió identificar un incremento en los niveles superficiales de CO con origen directo en el foco ígneo de San Justo. Durante las primeras horas del 3 de agosto de 2025 (entre las 00 y las 03 h), el patrón de vientos dominantes impulsó el transporte horizontal de la pluma en dirección oeste-sudoeste, extendiendo el impacto atmosférico hacia los departamentos de Río Primero, Colón y Córdoba Capital (véase Figura 2).

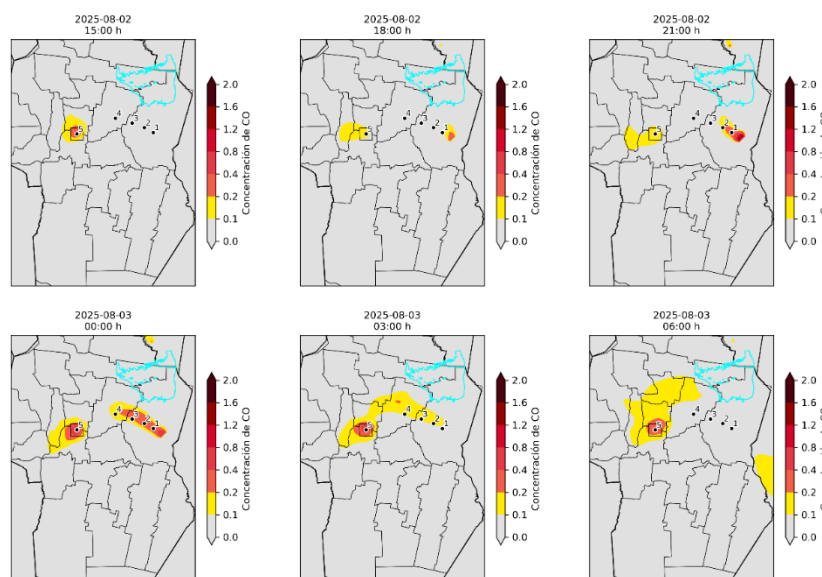


Figura 2 – Evolución de la concentración de CO (ppm) durante el evento. Localidades: (1) La Francia, (2) Villa Concepción del Tío y (3) La Tordilla del departamento de San Justo, (4) Villa Santa Rosa del departamento de Río Primero y (5) Córdoba.

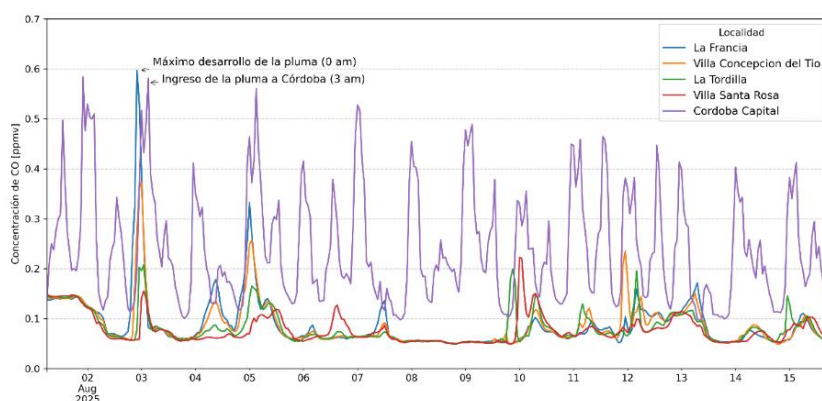


Figura 3 – Evolución de la concentración de CO durante la primera quincena de agosto de 2025.

En términos de calidad del aire, las localidades rurales y suburbanas en la línea de dispersión presentaban concentraciones medias de fondo de entre 0,08 y 0,09 ppm para el período analizado. Durante el pasaje de la pluma, los picos horarios alcanzaron 0,60 ppm en La Francia, 0,37 en Villa Concepción del Tío y 0,21 en La Tordilla. Esto representó un factor de incremento ($C_{\text{pico}} / C_{\text{fondo}}$) de 6,67, 4,11 y 2,63 respectivamente (equivalente a aumentos del 162,5% al 567,8% sobre la línea de base). En el caso de Córdoba Capital, cuyo nivel medio basal de CO es mayor (0,24 ppm) debido a la mayor densidad demográfica (Pepino Minetti et al., 2020), la variación relativa pico no resultó porcentualmente dominante. No obstante, la intrusión de la pluma a las 03 h del 3 de agosto generó una perturbación medible sobre el ciclo diurno típico como muestra la Figura 3, incrementando la integral temporal de exposición (área bajo la curva) durante la madrugada y demostrando un aporte exógeno superpuesto a la señal de contaminación típica de la ciudad.

Conclusiones

El presente trabajo evaluó la capacidad del modelo WRF-Chem para simular el transporte regional y el impacto en la calidad del aire debido a un incendio rural al este provincial integrando herramientas de percepción remota e inventarios locales de emisiones. El modelo demostró capacidad de representación de la dinámica atmosférica regional con una correlación moderada ($r \sim 0,4$) y un sesgo relativo del 27%, considerado admisible en el marco del diagnóstico exploratorio. Las simulaciones permitieron evaluar el patrón de la perturbación atmosférica originado por el evento de fuego a lo largo de más de 180 km afectando sucesivamente a los departamentos de San Justo, Río Primero, Colón y Córdoba Capital. Los resultados evidencian que en poblaciones rurales y suburbanas en la trayectoria directa de la pluma (La Francia, Villa Concepción del Tío y La Tordilla), el paso del evento generó incremento entre 2,33 y 6,67 veces los niveles de fondo basales (0,08 - 0,09 ppm), equivalentes a aumentos de hasta 567%. Los hallazgos confirman la utilidad de la modelación numérica como herramienta complementaria y estratégica para la gestión del riesgo atmosférico y la toma de decisiones en regiones que carecen de redes de monitoreo continuo en tiempo real.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta IA Gemini para su uso en la introducción y desarrollo con la finalidad de resumir información de trabajos consultados. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos obtenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

Dirección Gestión de Riesgos (Ministerio de Seguridad) [SGRCCyPC] e Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (Ministerio de Economía y Gestión Pública, Secretaría de Ingresos Públicos) [IDECOR] (Febrero 2026). Informe Anual de Áreas Afectadas por Incendios Forestales y Rurales 2025, en la Provincia de Córdoba.

European Space Agency [ESA]. (2025). Copernicus Sentinel-2 MSI Data (Sentinel-2P) [Dataset]. Copernicus Data Space Ecosystem / Copernicus Browser. Recuperado de <https://browser.dataspace.copernicus.eu>

Kumar R., Naja M., Pfister G. G., Barth M. C., Wiedinmyer C., Brasseur G. P. (2012). Simulations over South Asia using the weather research and forecasting model with chemistry (WRF-Chem): chemistry evaluation and initial results. *Geoscientific Model Development Discuss. (GMDD)*, 5(2), 321-343.

Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Tavera Busso, I. (2019). Influence of meteorological variables and forest fires events on air quality in an urban area (Córdoba, Argentina). *Archives Environmental Contamination Toxicology*, 77, 171-179.

NOAA / Amazon Web Services. (2024). NOAA Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) 16, 17, 18 & 19 [Dataset]. Registry of Open Data on AWS. Recuperado de <https://registry.opendata.aws/noaa-goes>

Pepino Minetti, R. C., López, E. G., Fonseca, J. M., Balcaza Pizzi, N., Allende García, M. C., Poncio, C. (2020). Estado de la calidad del aire de la ciudad de Córdoba: actualización a casi dos décadas de su última evaluación. In E. d. I. U. T. Nacional (Ed.), *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina*, V.

Puliafito S. E., Bolaño-Ortiz T. R., Berná Peña L. L., Pascual-Flores R. M. (2020). Dataset supporting the estimation and analysis of high spatial resolution inventories of atmospheric emissions from several sectors in Argentina, *Data in Brief*, 29, 105281.

World Health Organization [WHO] (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
<https://iris.who.int/handle/10665/345329>. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO