

Monitoreo de la calidad del aire utilizando imágenes satelitales y SIG: Aplicación de Sentinel-5P y QGIS en Manzanillo, Colima, durante el incendio del Cerro del Toro en el mes de mayo, 2024

Resumen: El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un contaminante atmosférico tóxico, principalmente de origen antropogénico, que tiene efectos adversos significativos en la salud humana y el medio ambiente. Este gas contribuye a la formación de ozono troposférico y lluvia ácida, además de ser un precursor de partículas finas como PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. La exposición al NO_2 está vinculada a problemas respiratorios y cardiovasculares, afectando especialmente a grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con enfermedades preexistentes. Las principales fuentes de emisión de NO_2 son el tráfico vehicular, las actividades industriales y la quema de combustibles fósiles.

Este estudio aplica el uso de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo de la calidad del aire, centrándose en las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) durante el incendio que tuvo lugar en el Cerro del Toro, en Manzanillo, Colima, entre el 20 y el 21 de mayo de 2024. Al emplear tecnologías avanzadas como el satélite Sentinel-5P y el software QGIS, el estudio busca demostrar la eficacia de estas herramientas en la detección y análisis de contaminantes atmosféricos en eventos de alta emisión, proporcionando datos críticos para la gestión ambiental y la salud pública.

PALABRAS CLAVE: Calidad del aire, Dióxido de nitrógeno, imágenes satelitales, QGIS, Sentinel 5P.



Colaboración

Yolanda Rosenda Monzón Herrera; Raúl Teodoro Aquino Santos, Mayren Polanco Gaytan, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2025

Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

Abstract: Nitrogen dioxide (NO_2) is a toxic air pollutant of primarily anthropogenic origin, with significant adverse effects on both human health and the environment. This gas contributes to the formation of tropospheric ozone and acid rain and is also a precursor to fine particles such as PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$. Exposure to NO_2 is linked to respiratory and cardiovascular problems, particularly affecting vulnerable groups such as children, the elderly, and people with pre-existing conditions. The primary sources of NO_2 emissions are vehicular traffic, industrial activities, and the burning of fossil fuels. Addressing NO_2 emissions is crucial for enhancing air quality and safeguarding both public health and ecosystems.

This study investigates the application of satellite imagery and Geographic Information Systems (GIS) for air quality monitoring, with a particular focus on nitrogen dioxide (NO_2) concentrations during the Cerro del Toro wildfire in Manzanillo, Colima, on May 20-21, 2024. By employing advanced technologies, such as the Sentinel-5P satellite and QGIS software, the study aims to demonstrate the effectiveness of these tools in detecting and analyzing air pollutants during high-emission events, thereby providing critical data for environmental management and public health.

KEYWORDS: Air quality, Nitrogen dioxide, satellite images, QGIS, Sentinel 5P.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un contaminante atmosférico tóxico [1], principalmente de origen antropogénico, que tiene efectos adversos significativos en la salud humana y el medio ambiente, como se destaca en el estudio de Sushil y Jaspal [2]. Las principales fuentes de emisión de NO_2 son el tráfico vehicular, las actividades industriales y la quema de combustibles fósiles. Un monitoreo preciso de las concentraciones de NO_2 es esencial para evaluar la calidad del aire y desarrollar estrategias efectivas para mitigar sus impactos negativos. Este monitoreo no solo ayuda a proteger la salud pública, sino que también contribuye a la formulación de políticas ambientales más informadas y efectivas.

Los incendios forestales son eventos que generan altas emisiones de contaminantes atmosféricos, como el NO_2 , los cuales pueden impactar significativamente en la calidad del aire tanto a nivel local como regional. La utilización de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporciona herramientas poderosas para el monitoreo de la calidad del aire durante estos eventos. Estas tecnologías permiten una evaluación detallada tanto espacial como temporal de las concentraciones de contaminantes, facilitando la identificación de áreas afectadas y la implementación de medidas de mitigación efectivas.

La integración de imágenes satelitales para la detección en tiempo real de la contaminación se está convirtiendo en una herramienta cada vez más crucial para la gestión de la calidad del aire, especialmente en regiones con infraestructura de monitoreo limitada. Este enfoque permite una evaluación continua y precisa de los niveles de contaminación, lo que es esencial para implementar estrategias de gestión del aire más efectivas [3].

En regiones portuarias y urbanas, como Manzanillo, Colima, la calidad del aire se ha convertido en un desafío ambiental y de salud pública, debido a la convergencia de actividades industriales, el tráfico vehicular y la alta densidad poblacional [4], [5], [8]. En este puerto, de relevancia nacional por su dinamismo comercial, se han identificado contaminantes críticos como dióxido de nitrógeno (NO_2), material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) y ozono troposférico (O_3), los cuales en diversos episodios superan los valores permitidos por la normatividad ambiental [5]. Esta situación se intensifica durante eventos críticos, como los incendios forestales, que generan incrementos abruptos en la concentración de contaminantes y deterioran significativamente la calidad del aire en la región [2].

Diversos estudios han demostrado que las operaciones portuarias y marítimas, junto con el transporte terrestre asociado, constituyen fuentes críticas de emisiones atmosféricas, situando a Manzanillo entre los puertos de mayor impacto en México por la liberación de NO_2 , SO_2 , partículas y gases de efecto invernadero [6], [7]. La com-

bustión de combustibles fósiles en buques y vehículos contribuye además a procesos fotoquímicos que favorecen la formación de ozono troposférico, incrementando los riesgos para la salud y el ambiente, lo que evidencia la necesidad urgente de medidas de mitigación en contextos urbanos y portuarios [8].

Si bien existen marcos regulatorios nacionales e internacionales para proteger la salud y el ambiente, las capacidades locales de monitoreo en Manzanillo presentan limitaciones considerables, ya que dependen principalmente de estaciones terrestres con baja cobertura espacial y temporal [7]. Esta situación dificulta obtener datos oportunos y precisos sobre la dinámica de los contaminantes en escenarios de alta emisión, lo que limita la formulación de estrategias de mitigación y prevención, así como la capacidad de respuesta ante emergencias ambientales [6], [7].

El desarrollo de tecnologías avanzadas, como los sistemas satelitales y los SIG, ha transformado el monitoreo atmosférico al permitir observaciones continuas, de amplio alcance y en tiempo casi real [3], [9]. En particular, el satélite Sentinel-5P, equipado con el espectrómetro TROPOMI, ofrece datos hiperespectrales de alta resolución sobre contaminantes clave como NO_2 , SO_2 , CO , O_3 y CH_4 [11]–[13]. La validación de estos datos es esencial para garantizar su eficacia y traducirlos en políticas ambientales efectivas [10]. Asimismo, la integración de mediciones satelitales con datos terrestres y herramientas SIG posibilita una mejor comprensión de la dinámica de la contaminación y su relación con factores socioeconómicos y demográficos, lo que aporta una base sólida para la formulación de políticas públicas adaptadas a regiones altamente presionadas como Manzanillo [14]–[16].

En este contexto, resulta fundamental replantear la forma en que se evalúa la calidad del aire en este puerto, mediante el uso de herramientas que permitan comprender con mayor detalle las variaciones espaciales y temporales de los contaminantes, fortalecer la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y contribuir al cumplimiento de la normatividad vigente, particularmente frente a contingencias como el incendio del Cerro del Toro ocurrido en 2024 [5], [10].

MATERIAL Y MÉTODOS

En el monitoreo de contaminantes en Manzanillo, se emplearon imágenes del satélite Sentinel-5P, que proporciona datos detallados a través de su sensor TROPOMI. Este sensor es capaz de capturar información de alta resolución sobre diversos contaminantes atmosféricos, lo que permite una evaluación precisa de la calidad del aire en la región. La utilización de estas imágenes satelitales es crucial para identificar patrones de contaminación y desarrollar estrategias efectivas de mitigación, especialmente en áreas con infraestructura de monitoreo limitada.

El instrumento de monitoreo troposférico, conocido como TROPOMI, es un espectrómetro pasivo de imágenes de retrodispersión solar que permite la adquisición de imágenes en ocho bandas espectrales [17]. Este avanzado dispositivo cubre múltiples dominios espectrales, que van desde el ultravioleta y el visible hasta el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), como se describe en el estudio [17]. La capacidad de TROPOMI para capturar datos en estas diversas bandas espectrales es crucial para el monitoreo detallado de la composición atmosférica, lo que facilita una mejor comprensión de los procesos troposféricos y contribuye significativamente a la investigación ambiental y climática.

Esta tecnología ha demostrado ser altamente efectiva en la detección de gases como el NO_2 , uno de los principales contaminantes que deterioran la calidad del aire en entornos urbanos. Según un estudio reciente, las imágenes satelitales del Sentinel-5P, y en particular los datos proporcionados por el sensor TROPOMI, constituyen una herramienta invaluable para el monitoreo integral y a gran escala de la contaminación del aire [18]. La capacidad de TROPOMI para ofrecer datos precisos y detallados permite a los investigadores y responsables de políticas ambientales evaluar y abordar de manera más efectiva los desafíos relacionados con la calidad del aire.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se utilizan en el monitoreo de la calidad del aire porque permiten integrar, visualizar y analizar de manera espacial y temporal la distribución de contaminantes, ofreciendo un soporte fundamental para la gestión ambiental en contextos urbanos y portuarios [14], [16]. Estas herramientas funcionan mediante la superposición de capas de información, que combinan datos satelitales –como los obtenidos por el instrumento TROPOMI del Sentinel-5P– con registros terrestres, variables socioeconómicas y demográficas, lo que posibilita un análisis integral de la dinámica de la contaminación [10], [15].

En cuanto a sus niveles de aplicación, los SIG operan tanto en escalas locales como regionales y globales. A nivel local, permiten identificar áreas críticas de exposición en ciudades como Manzanillo, vinculando la contaminación atmosférica con factores poblacionales y de infraestructura [14]. A nivel regional, facilitan la evaluación comparativa entre distintas zonas portuarias o industriales, mientras que, en la escala global, los SIG se convierten en herramientas clave para el seguimiento de tendencias y la formulación de políticas ambientales internacionales basadas en evidencia científica [13], [16].

Preprocesamiento de imágenes

Se llevó a cabo una proyección de imagen utilizando SNAP (Sentinel Application Platform), un software gratuito desarrollado por la Agencia Espacial Europea

(ESA) diseñado para procesar y analizar imágenes satelitales, especialmente aquellas provenientes de las misiones Sentinel del programa Copernicus. SNAP tiene como objetivo principal facilitar el acceso y tratamiento de datos de observación de la Tierra, lo que es crucial para aplicaciones en medio ambiente, agricultura, gestión de recursos y monitoreo territorial, como se describe en el estudio [4]. La capacidad de SNAP para manejar grandes volúmenes de datos satelitales permite a los investigadores y profesionales del sector optimizar sus análisis y tomar decisiones informadas basadas en datos precisos y actualizados.

El procesamiento y análisis de datos en ArcGIS se lleva a cabo a través de varias etapas sistemáticas. Inicialmente, se realiza el preprocesamiento de las imágenes del satélite Sentinel-5P para corregir cualquier distorsión o artefacto que pueda afectar los resultados, como se ilustra en la Figura 1. Este proceso incluye la calibración radiométrica y la corrección atmosférica de las imágenes, asegurando que los datos reflejen con precisión las concentraciones de contaminantes. La calibración radiométrica y la corrección atmosférica son procesos fundamentales para garantizar la fidelidad y precisión de los datos obtenidos [11], [19]. Estas técnicas aseguran que los valores derivados de sensores como TROPOMI del Sentinel-5P reflejen de manera precisa las condiciones reales de la atmósfera observada [11], [19].

La calibración radiométrica se refiere a la conversión de las señales digitales registradas por los sensores satelitales en valores físicos medibles, como la radiancia, eliminando errores instrumentales o variaciones del sensor [13], [17]. Esto permite que las imágenes sean comparables a lo largo del tiempo y entre diferentes plataformas, mejorando la consistencia de los resultados en estudios ambientales [13], [17].

Por su parte, la corrección atmosférica elimina los efectos que las partículas atmosféricas, los aerosoles y el vapor de agua provocan en la señal registrada por el sensor [12], [18]. Esta corrección es esencial para obtener datos que representen únicamente la reflectancia o concentración del contaminante objetivo, como el NO_2 , sin distorsiones inducidas por la atmósfera [12], [18].

Posteriormente, se emplean herramientas analíticas dentro de ArcGIS para aplicar modelos de interpolación y análisis espacial. Esto permite identificar áreas críticas y correlacionar la contaminación con variables socioeconómicas y demográficas, como se observó en el caso del incendio en el Cerro del Toro, en Manzanillo. La capacidad de ArcGIS para integrar y analizar estos datos es crucial para desarrollar estrategias efectivas de gestión ambiental y mitigación de riesgos.

Se emplearon diversas fórmulas para convertir las unidades de mol/m^2 a ppm (partes por millón), que es la

unidad de medida utilizada para expresar concentraciones muy pequeñas de una sustancia dentro de otra. Este proceso de conversión es crucial para garantizar que las concentraciones de contaminantes se presenten en un formato estándar y comprensible, facilitando así la interpretación y comparación de los datos.

Ecuaciones

Concentración molar superficial (mol/m^2). Esta unidad es utilizada inicialmente por los sensores satelitales como TROPOMI, que miden la cantidad de NO_2 por unidad de superficie en una columna atmosférica [19].

Para convertir moles por metro cuadrado (mol/m^2) a partes por millón (ppm) de dióxido de nitrógeno (NO_2), primero se debe convertir la concentración molar en concentración en masa (g/m^2), y luego en ppm. La conversión de mol/m^2 a ppm de NO_2 no es directa, ya que mol/m^2 representa una concentración molar en una superficie, mientras que ppm es una concentración en volumen.

La Ecuación 1 presenta la conversión a concentración volumétrica (mol/m^3). Para convertir mol/m^2 a mol/m^3 se multiplica por la altura de la columna atmosférica considerada. En el estudio se utiliza una altura de 7000 metros (7 km), correspondiente al rango de observación troposférica del sensor [19]. Por ejemplo, si se está considerando una columna de aire con una altura de 'h' metros, la concentración molar en mol/m^2 sería (mol/m^2) * h (m). En este estudio la altura de la columna es de 7 km, es decir 7000m, debido a que TROPOMI realiza un muestreo espacial de $7\text{km} \times 7\text{km}$, esto debido a que el NO_2 se encuentra en la tropósfera [19].

Para el NO_2 troposférico o el ozono troposférico, Sentinel-5P recupera específicamente concentraciones limitadas a la troposfera (aproximadamente desde la superficie hasta una altitud de 8 a 15 km, según la latitud y la estación). El NO_2 troposférico es el foco principal del monitoreo de la calidad del aire, porque está más cerca de las actividades humanas como el tráfico y la industria. Por lo que se rescata que la altura de la columna para este estudio es de 7km, la operación de $15-8=7$.

$$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = \frac{\text{mol}}{\text{m}^2} * \text{Column height} \quad \text{Ec. (1)}$$

El siguiente paso fue la conversión a concentración en masa (g/m^2).

Se transforma la concentración molar volumétrica a concentración en masa utilizando la masa molar del NO_2 , que es de 46.0055 g/mol [21]:

$$\frac{\text{g}}{\text{m}^3} = \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} * \text{masa molar del } \text{NO}_2 \quad \text{Ec. (2)}$$

Y por último fue calcular la ppm, donde se considera a la densidad del NO_2 en condiciones estándar, es decir,

0 °C o 273.15 K y 1 atm, aproximadamente 1.697 g/m^3 . Para lo anterior se utilizó como referencia la ecuación de los gases ideales en forma de densidad [22]:

$$PV = nRT \quad \text{Ec. (3)}$$

Pero la densidad p (en g/m^3) es:

$$p = \frac{m}{v} = \frac{nM}{V} \quad \text{Ec. (4)}$$

Cálculo de densidad del NO_2 (p). Para convertir la concentración en masa a ppm, se requiere conocer la densidad del NO_2 en condiciones estándar (0 °C y 1 atm). Esta se obtiene mediante la ecuación de los gases ideales en forma de densidad [22]:

$$p = \frac{PM}{RT} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

p: densidad (g/m^3)

P: presión (en Pa = pascuales)

M: masa molar (g/mol)

R: constante de los gases = 8.314 $\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$

T: temperatura absoluta (K)

Datos:

$P=1\text{atm}=101325\text{Pa}$

$T=0^\circ\text{C}=273.15\text{K}$

$M=46.0055\text{g}/\text{mol}$

$R = 8.314 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$

Conversión final a ppm. Finalmente, se utiliza la fórmula para convertir la concentración en masa a partes por millón:

$$\text{ppm} = \left(\text{concentración en masa} \frac{\frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{\text{densidad } \text{NO}_2 (p)} \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

Sustituyendo la fórmula:

$$p = \frac{(101325\text{Pa}) \left(\frac{46.0055\text{g}}{\text{mol}} \right)}{\left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \right) (273.15\text{K})}$$

$$p = \frac{4664865.288}{2271.0951} \approx 1.697\text{g}/\text{m}^3$$

Este conjunto de métricas y conversiones permite interpretar los datos satelitales en un formato utilizable para la evaluación de la calidad del aire, facilitando la comparación con normas ambientales y el análisis de riesgo por exposición a contaminantes [19], [22], [21].

El presente estudio se desarrolló con fines estrictamente académicos. Los datos analizados no fueron reportados a ninguna instancia gubernamental, y su tratamiento se centró en evaluar el comportamiento de los contaminantes desde una perspectiva científica y exploratoria.

Para determinar la concentración en partes por millón (ppm), que es un referente clave según la Norma Oficial

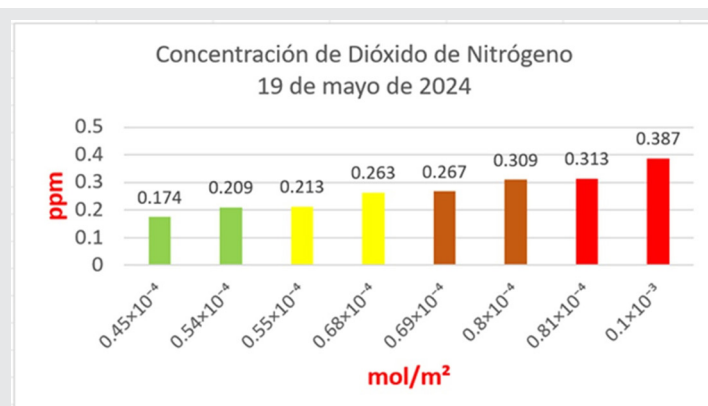
Mexicana (NOM), se considera la NOM-023-SSA1-2021. Esta norma establece un límite máximo para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en el aire de 0.106 ppm, calculado como un promedio de una hora, una vez al año, con el objetivo de proteger la salud de la población [5], [20]. Cabe destacar que esta norma no especifica un límite promedio para un período de 24 horas. Sin embargo, la Norma Oficial Mexicana NOM-172-SE-MARNAT-2023, publicada posteriormente, introduce valores normativos para la concentración de NO_2 en el aire, reforzando las medidas de protección a la salud pública [5].

RESULTADOS

El análisis de las imágenes satelitales Sentinel-5P, procesadas con SNAP y ArcGIS y representadas en QGIS, permitió identificar cambios importantes en la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en Manzanillo, Colima, al inicio y durante del incendio en el Cerro del Toro (20–21 de mayo de 2024).

Al inicio del incendio (19 de mayo), los niveles de NO_2 se encontraban por encima de los parámetros aceptables, con valores mayores a 0.1 ppm y menores a 0.4, como se observa en la Figura 1 y la Gráfica 1. Así mismo, durante los días 20 y 21 de mayo, coincidiendo con el incendio, se registró un incremento abrupto superior al 300 %, alcanzando hasta 0.503 ppm en algunas zonas específicas (Figuras. 2 y 3; Gráficas. 2 y 3). Estos niveles superan ampliamente el límite de exposición de 0.106 ppm establecido por la NOM-023-SSA1-2021, clasificándose la calidad del aire como “muy mala” o “extremadamente mala”, de acuerdo con la NOM-172-SE-MARNAT-2023.

suroeste del municipio, en concordancia con la dirección predominante del viento. Esto indica que los contaminantes se dispersaron hacia zonas pobladas como el puerto de Manzanillo y colonias aledañas. Asimismo, las gráficas de concentración (Gráficas 1 a 4) muestran picos bien definidos durante el incendio, seguidos de una disminución progresiva en los días posteriores, lo que refleja la dispersión y reducción natural del contaminante conforme se extinguió el fuego. A su vez, la tabla 1 muestra la obtención del índice aire y salud para dióxido de nitrógeno (NO_2) y la representación en colores el nivel de riesgo asociado a la calidad del aire de las figuras 1, 2, 3 y 4.



Gráfica 1: Concentración de NO_2 en mol/m^2 y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SE-MARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm.

Fuente: elaboración propia.

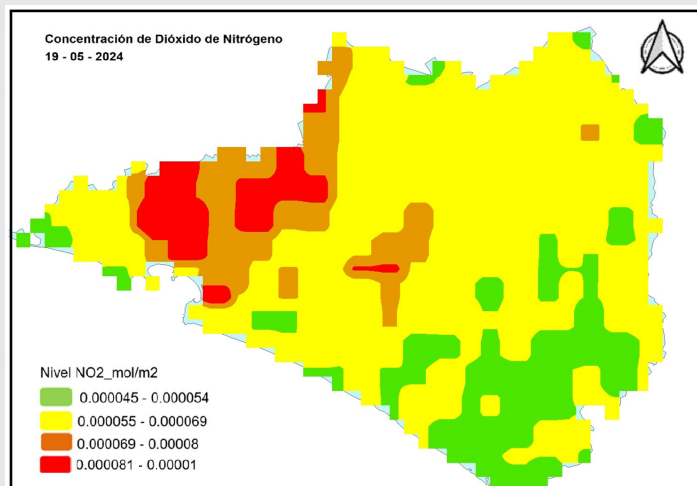


Figura 1: Imagen de la concentración de Dióxido de nitrógeno del 19 de mayo del 2024, antes del incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima.

Fuente: Elaboración propia datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.

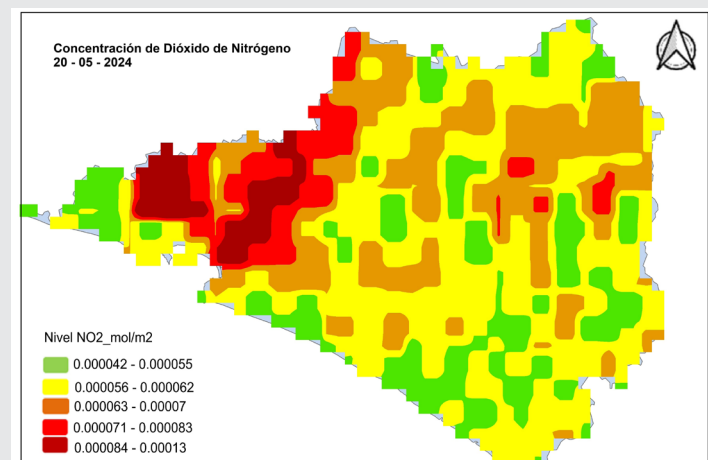
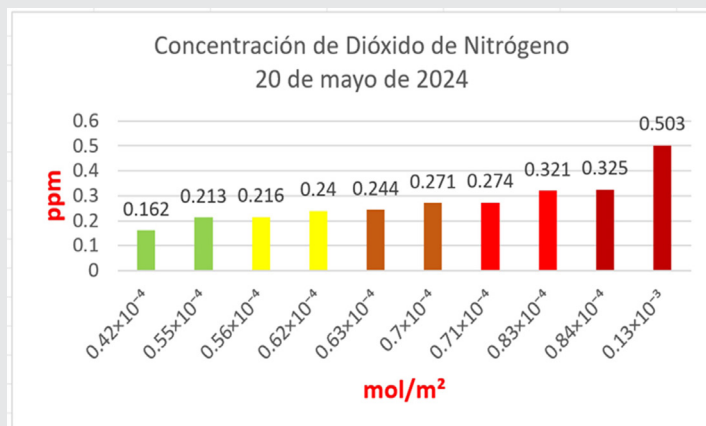


Figura 2: Concentración de Dióxido de nitrógeno del 20 de mayo del 2024, durante el incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima.

Fuente: Elaboración propia, datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.

Las imágenes satelitales Figuras 1 a 4 evidencian que las concentraciones más altas se registraron al sur y

En la figura 2, se muestra la mayor concentración de NO_2 , teniendo como referencia la Tabla 1 y la Gráfica 1, que muestra, que esta concentración rebasa los límites permitidos por la NOM-023-SSA1-2021.



Gráfica 2: Concentración de NO₂ en mol/m² y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm. Fuente: Elaboración propia.

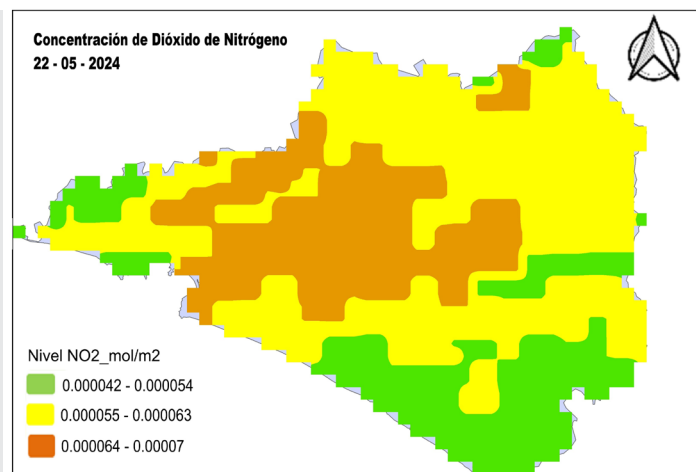


Figura 4: Imagen de la concentración de Dióxido de nitrógeno del 22 de mayo del 2024, antes de extinguir el incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.

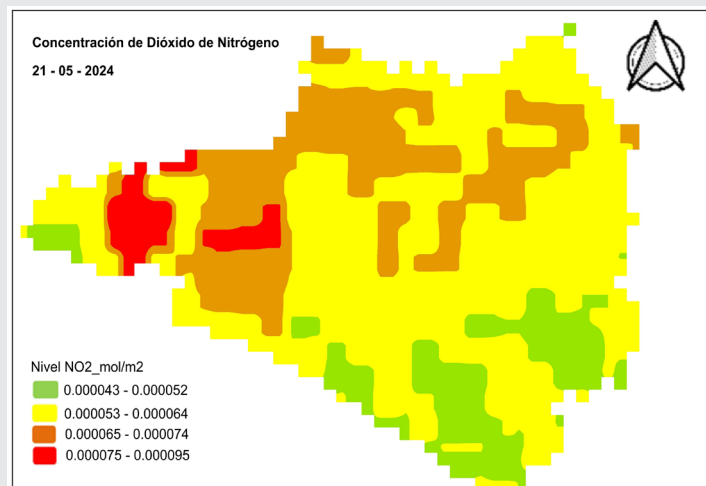
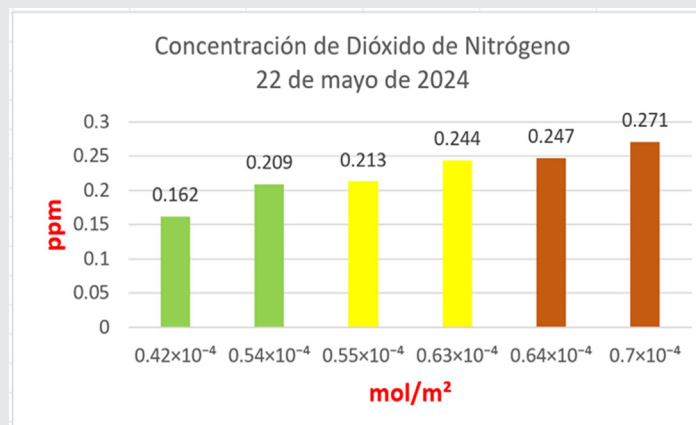
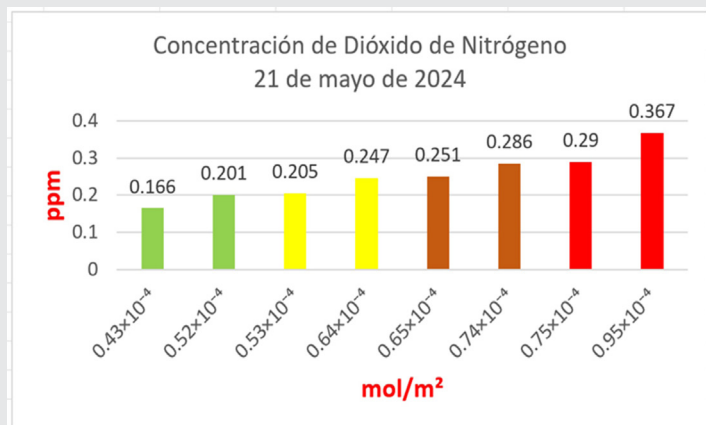


Figura 3: Imagen de la concentración de Dióxido de nitrógeno del 21 de mayo del 2024, antes de extinguir el incendio en el cerro del Toro, Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia datos e imágenes tomadas de Copernicus browser.



Gráfica 4: Concentración de NO₂ en mol/m² y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 3: Concentración de NO₂ en mol/m² y en ppm rebasando el límite permitido por la NOM-023-SSA1-2021 y la NOM-172-SEMARNAT-2023, que marcan que es de 0.106 ppm. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 1, muestra los rangos de concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) en partes por millón (ppm) y su asociación con niveles de riesgo a la salud, conforme a la NOM-172-SEMARNAT-2023 y a la NOM-023-SSA1-2021, en esta tabla se describen seis categorías de calidad del aire: Buena, Aceptable, No Aceptable, Mala, Muy mala y Extremadamente mala, cada una vinculada con un nivel de riesgo (Bajo, Moderado, Moderado alto, Alto, Muy Alto y extremadamente alto, respectivamente) y representada mediante un código de colores (azul claro, azul, verde, amarillo, naranja y rojo). Esta representación facilita la interpretación visual de los niveles de contaminación observados en las figuras 1, 2, 3 y 4.

Tabla 1: Obtención del índice aire y salud para dióxido de nitrógeno (NO₂).

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de dióxido de nitrógeno (NO ₂) promedio de una hora (ppm)	Color que lo representa
Buena	Bajo	≤ 0.053	
Aceptable	Moderado	>0.053 a 0.106	
No aceptable	Moderado alto	>0.106 a 0.160	
Mala	Alto	>0.160 a 0.213	
Muy Mala	Muy Alto	> 0.213 a 0.266	
Extremadamente mala	Extremadamente alto	> 0.266	

Fuente: Elaboración propia en base a la NOM-172-SEMAR-NAT-2023, SEMARNAT, 2024 y a la NOM-023-SSA1-2021.

RESULTADOS

Discusión

Los resultados confirman la utilidad de las imágenes satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo de la calidad del aire en eventos de alta emisión como incendios forestales. En este caso, el sensor TROPOMI del Sentinel-5P permitió detectar incrementos puntuales y regionales de NO₂ en Manzanillo, validando su efectividad en contextos locales con infraestructura limitada de monitoreo terrestre.

El incremento registrado fue considerable: las concentraciones superaron en más del triple el límite normativo de 0.106 ppm, alcanzando hasta 0.43 ppm. Esto representa un riesgo serio para la salud de la población, particularmente para grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias. Aunque los niveles disminuyeron tras el incendio, se mantuvieron por encima de lo aceptable hasta al menos el 22 de mayo, lo que demuestra que los efectos se prolongan más allá del evento inicial.

La integración metodológica de Sentinel-5P con SNAP, ArcGIS y QGIS no solo permitió identificar el aumento de contaminantes, sino también visualizar su distribución espacial y temporal. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Zhang [3], quien subraya que las tecnologías satelitales ofrecen ventajas clave en regiones con capacidades limitadas de monitoreo terrestre.

En términos ambientales, los resultados muestran que eventos naturales como incendios forestales pueden generar niveles de contaminación comparables o incluso superiores a los de las fuentes industriales tradicionales. Esto enfatiza la necesidad de políticas ambientales que consideren emergencias y escenarios de cambio climático, así como la incorporación sistemática de herramientas como Sentinel-5P en planes municipales y estatales de gestión de la calidad del aire.

Finalmente, aunque este estudio no fue vinculado directamente con políticas públicas ni comunicado a instancias oficiales, aporta bases sólidas para investigaciones futuras. La integración de datos de salud pública con mediciones satelitales podría ayudar a identificar efectos crónicos derivados de exposiciones cortas pero intensas a contaminantes, contribuyendo al diseño de protocolos de alerta temprana y a la planeación urbana y ambiental con fundamento científico.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra la eficacia de integrar imágenes satelitales del Sentinel-5P, mediante el sensor TROPOMI, con plataformas de análisis geoespacial como SNAP, ArcGIS y QGIS, para el monitoreo de la calidad del aire en contextos de alta emisión contaminante. La evaluación realizada durante el incendio del Cerro del Toro en Manzanillo, Colima, permitió detectar incrementos sustanciales en las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂), superando con creces los límites establecidos por la normatividad mexicana vigente (NOM-023-SSA1-2021 y NOM-172-SEMAR-NAT-2023).

La metodología empleada permitió una representación detallada, tanto espacial como temporal, de la evolución del contaminante, mostrando su máxima concentración durante el 20 de mayo de 2024 y una dispersión significativa en los días posteriores. Este tipo de análisis es esencial para comprender el comportamiento de los contaminantes atmosféricos durante eventos críticos, y evidencia la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas de monitoreo remoto en los planes de gestión ambiental a nivel local y regional.

Asimismo, los hallazgos sugieren un fuerte vínculo entre los eventos de incendios forestales y la degradación de la calidad del aire, con posibles implicaciones directas en la salud de la población expuesta. Por tanto, se recomienda el uso continuo y sistemático de sensores satelitales como Sentinel-5P para fortalecer las redes de monitoreo en zonas con infraestructura limitada, así como para apoyar a las autoridades en la toma de decisiones informadas ante emergencias ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis asesores de tesis, la Dra. Mayren Polanco Gaytán y el Dr. Raúl Teodoro Aquino Santos, que con su motivación y acompañamiento me han permitido la elaboración de este, mi primer artículo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. S. Taha, S. Idoudi, N. Alhamdan, R. H. Ibrahim, R. Surkatti, A. Amhamed, and O. F. Alrebei, "Comprehensive review of health impacts of the exposure to nitrogen oxides (NO_x), carbon dioxide (CO₂), and particulate matter (PM)," *Journal of Hazardous Ma-*

terials Advances, vol. 19, p. 100771, 2025. doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100771.

[2] S. K. Pandey y J. Singh, "Nitrogen dioxide: Risk assessment, environmental, and health hazard," en *Hazardous Gases*, J. Singh, R. D. Kaushik y M. Chawla, Eds., Academic Press, 2021, pp. 273-288. ISBN: 978-0-323-89857-7. doi: 10.1016/B978-0-323-89857-7.00001-3.

[3] Z. Zhang, D. Leng, Y. Li, X. Gui, Y. Cheng, J. Zhao, Z. Zhang, and A. M. Y. M. Ghias, "Artificial intelligence-driven insights: Precision tracking of power plant carbon emissions using satellite data," *Energy Convers. Econ.*, vol. 5, pp. 293-300, 2024. doi: 10.1049/enc2.121.

[4] P. Urrego, N. Pasqualotto, and J. Delegido, *Introducción a la teledetección y aplicaciones medioambientales del programa europeo Copernicus*. Calidad de aguas continentales, Univ. de Oporto, 2018. [Online]. Available: https://www.copernicus-user-uptake.eu/fileadmin/FPCUP/dateien/resources/2018-2-23/Tutorial_Copernicus_2020_Oporto_03.pdf

[5] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), NOM-172-SEMARNAT-2023, *Diario Oficial de la Federación*, Jan. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5715154&fecha=25/01/2024#gsc.tab=0.

[6] D. Toscano, "The Impact of Shipping on Air Quality in the Port Cities of the Mediterranean Area: A Review," *Atmosphere*, vol. 14, no. 7, p. 1180, 2023. doi: 10.3390/atmos14071180.

[7] G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, J. M. Baldasano Recio, J. D. W. Kahl, E. Granados Hernández, A. L. Alarcón Jiménez, and R. E. Antonio Durán, "Atmospheric Emissions in Ports Due to Maritime Traffic in Mexico," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 11, p. 1186, 2021. doi: 10.3390/jmse9111186.

[8] A. Souza, J. de Oliveira-Júnior, K. Cardoso, and S. Gautam, "Impact of vehicular emissions on ozone levels: A comprehensive study of nitric oxide and ozone interactions in urban areas," *Geosyst. Geoenviron.*, vol. 4, p. 100348, 2024. doi: 10.1016/j.geogeo.2024.100348.

[9] T. A. E. Damaty and E. A. Ghanem, "GIS, GPS, and RS measurements for air quality determination in the port of Damietta Egypt," 2020. [Online]. Available: <https://www.azharcermjournal.com/CERMF2010/P20-10-23.pdf>.

[10] F. Tack et al., "Assessment of the TROPOMI tropospheric NO₂ product based on airborne APEX observations," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 615-646, 2021. doi: 10.5194/amt-14-615-2021.

[11] C. Corradino, P. Jouve, A. La Spina, and C. Del Negro, "Monitoring Earth's atmosphere with Sentinel-5 TROPOMI and Artificial Intelligence: Quantifying volcanic SO₂ emissions," *Remote Sens. Environ.*, vol. 315, p. 114463, 2024. doi: 10.1016/j.rse.2024.114463. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425724004899>.

[12] Instituto de Aeronomía de Bélgica (BIRA-IASB), Agencia Espacial Europea (ESA), et al., *Documento de validación y caracterización de Sentinel-5P TROPOMI*, 2024. [Online]. Available: https://mpc-vdaf.tropomi.eu/ProjectDir/reports//pdf/S5P-MPC-IASB-ROCVR-24.00.00_FINAL_signed.pdf.

[13] A. Keppens et al., "5 years of Sentinel-5P TROPOMI operational ozone profiling and geophysical validation using ozonesonde and lidar ground-based networks," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 17, pp. 3969-3993, 2024. doi: 10.5194/amt-17-3969-2024.

[14] W. M. C. J. B. Kulasinghe and A. K. R. N. Ranasinghe, "Study the effect of human activities on air quality of Sri Lanka using satellite images Sentinel 5P," 2024. [Online]. Available: <https://acrs-aars.org/proceeding/ACRS2024/AB0115.pdf>.

[15] H. Trinh, V. Le, T. Tong, and S. Mai, "Mapping the spatial distribution of air pollutants in Quang Ninh province (Vietnam) using Sentinel 5P data," *Geodetski Vestnik*, vol. 68, pp. 313-326, 2024. doi: 10.15292/geodetski-vestnik.2024.03.313-326.

[16] D. K. Misra and A. Siddiqui, "Remote sensing and GIS application: An overview," 2016. [Online]. Available: http://vtucs.com/wp-content/uploads/2016/05/Remote_Sensing_and_GIS_Application_IJCSIT.pdf.

[17] A. Lorente, K. F. Boersma, H. J. Eskes, J. P. Veefkind, J. Van Geffen, M. B. De Zeeuw, H. A. C. D. Van Der Gon, S. Beirle, and M. C. Krol, "Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI," *Sci. Rep.*, vol. 9, pp. 1-10, 2019.

[18] A. Reshi, S. Pichuka, and A. Tripathi, "Applications of Sentinel-5P TROPOMI Satellite Sensor: A Review," *IEEE Sens. J.*, pp. 1-1, 2024. doi: 10.1109/JSEN.2024.3355714.

[19] Copernicus: Sentinel-5P - eoPortal, Oct. 2, 2024. [Online]. Available: <https://www.eoportal.org>.

org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#-ground-segment. [Accessed: Apr. 13, 2025].

[20] Secretaría de Salud, NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental, Diario Oficial de la Federación, oct. 27, 2021. [Online]. Available: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0.

[21] Webqc, "Calculadora de masa molar, peso molecular y composición elemental," WebQC, Chemical Portal, 2025. [Online]. Available: <https://es.webqc.org/molecular-weight-of-NO2%28g%29.html>.

[22] K. M. Tenny and J. S. Cooper, "Ideal Gas Behavior," StatPearls, 2024. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441936/>.

