



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Estudios de Postgrado
Doctorado en Física

**NO₂, DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TENDENCIAS SOBRE EL TERRITORIO
GUATEMALTECO, ENTRE 2005 Y 2021, EMPLEANDO DATOS DE OMI**

Ciencias de la Atmósfera

M.A. Krista Ivonne Aguilar Ovando

Dr. José Agustín García Reynoso -ICAyCC, UNAM-

Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas -ICAyCC, UNAM-

Guatemala, abril 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**NO₂, DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TENDENCIAS SOBRE EL TERRITORIO
GUATEMALTECO, ENTRE 2005 Y 2021, EMPLEANDO DATOS DE OMI**

TRABAJO DE TESIS

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
POR

M.A. KRISTA IVONNE AGUILAR OVANDO
ASESORADO POR DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO Y
DRA. CLAUDIA INÉS RIVERA CÁRDENAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

DOCTORA EN FÍSICA

GUATEMALA, ABRIL 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DIRECTOR	M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
REPRESENTANTE DOCENTE	Arqta. Ana Verónica Carrera Vela
REPRESENTANTE DOCENTE	M.A. Pedro Peláez Reyez
REPRESENTANTE DE EGRESADOS	Lic. Urías Amitaí Guzmán García
REPRESENTANTE DE ESTUDIANTES	Br. Elvis Enrique Ramírez Mérida
REPRESENTANTE DE ESTUDIANTES	Br. Oscar Estuardo García Orantes
SECRETARIO	M.Sc. Freddy Estuardo Rodríguez Q.

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

EXAMINADOR	Dr. Edgar Josué Arellano -ICAYCC, UNAM-
EXAMINADOR	Dr. Wolfgang M. H. Stremme -ICAYCC, UNAM-
EXAMINADOR	Dr. Oscar Augusto Peralta -ICAYCC, UNAM-

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

NO₂, DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TENDENCIAS SOBRE EL TERRITORIO GUATEMALTECO, ENTRE 2005 Y 2021, EMPLEANDO DATOS DE OMI

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha (2 de agosto de 2023).

M.A. Krista Ivonne Aguilar Ovando

ACTO QUE DEDICO A:

Mis hijos

Su amor y alegría son la fuerza que me impulsa a seguir adelante. Este logro es para ustedes, con la esperanza de que aprendan que con dedicación y esfuerzo, los sueños pueden hacerse realidad.

Mis esposo

Por ser mi roca y mi refugio, por su paciencia infinita y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Este camino no habría sido posible sin tu apoyo incondicional.

Mis padres

Gracias por su apoyo y por sembrar en mí la curiosidad que me trajo hasta aquí.

Mi hermana

Cuya inteligencia y capacidad siempre he admirado profundamente. Este logro también es un recordatorio de que nuestros talentos pueden brillar en cualquier momento y en cualquier lugar. Siempre he creído en ti y en el impacto positivo que puedes seguir dejando en el mundo.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis tutores

Dr. Agustín García y la Dra. Claudia Rivera, por su invaluable guía y dedicación a lo largo de este camino. Su experiencia, paciencia y consejos han sido pilares fundamentales en la construcción de este trabajo. Gracias por creer en mí y por inspirarme a alcanzar nuevos horizontes.

Mi familia

Mi mayor fuente de apoyo y fortaleza. Gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino, por su amor incondicional y por creer en mí incluso en los momentos más desafiantes. Su confianza, paciencia y ánimo han sido fundamentales para alcanzar esta meta. Este logro es tan mío como suyo, y les agradezco profundamente por ser mi refugio y mi inspiración constante.

Mis colegas

Ricardo Contreras, compañero de investigación y amigo. Compartir este recorrido contigo ha sido un privilegio.

Finalmente, agradezco a todas las personas, instituciones y colaboradores que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de esta tesis. Cada aporte ha sido esencial para alcanzar esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Dióxido de Nitrógeno	1
1.1.1. Dióxido de nitrógeno en la atmosfera y sus impactos	1
1.1.1.1. Dióxido de nitrógeno y cambio climático	2
1.1.1.2. Dióxido de nitrógeno y salud humana	3
1.1.1.3. Otros efectos del dióxido de nitrógeno en la atmósfera	3
1.1.2. Origen del dióxido de nitrógeno en la atmósfera	4
1.1.3. Eliminación del dióxido de nitrógeno en la atmósfera	4
1.1.4. Mediciones de dióxido de nitrógeno en atmósfera	5
1.1.5. Mediciones de dióxido de nitrógeno en Guatemala	6
1.2. Teledetección Satelital	7
1.2.1. Propiedades Espectrales de los Objetos Terrestres	9
1.2.2. Sensores Remotos y Sistemas Satelitales	9
1.2.3. Aplicación de Teledetección Satelital en el Estudio Atmosférico ..	10
1.2.4. Características de los satélites de observación atmosférica	10
1.2.5. Satélites y sus instrumentos para observación atmosférica	11
1.2.6. Satélite Aqua	12
1.2.7. Satélite Terra	13
1.2.8. Satélite Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership)	13

1.2.9. Satélite GOES Series	14
1.2.10. Satélite Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P)	14
1.2.11. Instrumento de Monitoreo de Ozono -OMI-	15
1.2.12. Evaluación de calidad para los datos provenientes de OMI	18
1.2.13. Procesamiento de Datos y Aplicaciones	19
1.2.14. OMI y la absorción por NO ₂	20
1.2.15. Emisión por NO ₂	20
1.2.16. Aplicaciones en la Observación Atmosférica	21
1.3. Descripción Geográfica de Guatemala	21
1.3.1. Guatemala, contexto regional y nacional	21
2. METODOLOGÍA	25
2.1. Determinación de variables espacio y tiempo	25
2.1.1. Período de estudio	25
2.1.2. Área de estudio	25
2.1.3. Región Sur	26
2.1.4. Región Centro	27
2.1.5. Región Norte	27
2.2. Tratamiento de datos	27
2.2.1. Origen de los datos	27
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	31
3.1. Periodicidad	31
3.2. Tendencia temporal general de NO ₂	31
3.3. Región sur, tendencia temporal de NO ₂	33
3.4. Región central, tendencia temporal de NO ₂	35
3.5. Región norte, tendencia temporal de NO ₂	36
3.6. Distribución espacial de NO ₂	38

CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. ¿Qué miden los satélites?	8
Figura 2. Instrumentos de medición de NO ₂	12
Figura 3. Consumo de combustibles en Guatemala	23
Figura 4. Generación de energía eléctrica en Guatemala	24
Figura 5. Separación del territorio de Guatemala por regiones de trabajo	27
Figura 6. Abundancias medias anuales de NO ₂ y tendencias para el territorio de Guatemala	32
Figura 7. Abundancias medias y tendencias para la región sur de Guatemala, para el NO ₂	34
Figura 8. Abundancias medias y tendencias para la región central de Guatemala, para el NO ₂	35
Figura 9. Abundancias medias y tendencias para la sub región norte de Guatemala, para el NO ₂	37
Figura 10. Distribución espacial de abundancias de NO ₂ sobre el territorio guatemalteco	39
Figura 11. Distribución espacial de las abundancias de NO ₂ sobre el territorio guatemalteco en época seca y lluviosa	41

TABLAS

Tabla 1. Límites de contaminantes atmosféricos establecidos por la EPA .. 6

Tabla 2. *Resoluciones espaciales de los instrumentos de medición de NO₂.* .. 16

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HNO₃	Ácido nítrico
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
CO₂	Dióxido de carbono
NO₂	Dióxido de nitrógeno
°C	Grados Celsius
h	Horas
km	Kilómetros
PM_{2.5}	Material particulado inferior a 2.5 micras
PM₁₀	Material particulado con tamaño entre 2.5 y 10 micras
CH₄	Metano
ug/m³	microgramo por metro cúbico
moléculas/cm²	moléculas por metro cuadrado
CO	Monóxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
NO	Óxido nítrico
O₃	Ozono
ppb	partes por billón
ppm	partes por millón
Tg	Teragramos
TgN/año	Teragramos de nitrógeno por año
H₂O_{vap}	Vapor de agua

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener las abundancias de NO₂ dentro del territorio guatemalteco, mediante el empleo de información satelital proveniente de OMI durante el período comprendido entre 2005 y 2021 para conocer la distribución espacial, su estacionalidad e identificar las fuentes de emisión.

Objetivos específicos

1. Aplicar las herramientas computacionales para la obtención y análisis de información satelital.
2. Analizar los ciclos estacionales y tendencias interanuales que pueden observarse en el comportamiento de la abundancia de NO₂ en la troposfera del territorio guatemalteco durante el período estudiado.
3. Analizar la influencia de los ciclos estacionales climáticos en la distribución anual del NO₂ troposférico.
4. Identificar la distribución espacial de las abundancias de NO₂ dentro del territorio guatemalteco.
5. A partir de información bibliográfica y las observaciones identificar cuales son las principales fuentes de generación del NO₂ dentro del territorio guatemalteco y en sus alrededores.

6. Identificar y correlacionar eventos puntuales y estacionales, con la distribución temporal de abundancias de NO_2 en la tropósfera.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es uno de los gases más relevantes en la química atmosférica, debido a sus importantes efectos sobre la salud humana, el clima, los ecosistemas y la calidad del aire. Este gas, de color marrón-rojizo tiene sus fuentes principales en las actividades antropogénicas, produciéndose en su mayoría a partir de la quema de combustibles fósiles y biomasa.

Es un gas que contribuye tanto al calentamiento global como a la formación de otros contaminantes secundarios, como el ozono troposférico (O_3) y el material particulado ($\text{PM}_{2.5}$). Si bien en muchos países el dióxido de nitrógeno se encuentra regulado mediante normativas que buscan limitar sus concentraciones en la atmósfera, en Guatemala no existen sistemas de monitoreo continuo, tanto en ciudades como a gran escala, que proporcionen datos en tiempo real sobre este gas en todo el territorio.

Los estudios de abundancia de NO_2 mediante teledetección satelital han demostrado ser una alternativa viable para el monitoreo atmosférico en aquellas regiones donde no se cuenta con la infraestructura en tierra para realizar las mediciones de forma directa. En particular, los datos proporcionados por el instrumento *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) a bordo del satélite AURA de la NASA han permitido obtener información sobre la abundancia de NO_2 en la tropósfera a nivel global. Estos datos permiten analizar la distribución espacial y temporal de los contaminantes, así como identificar las fuentes principales de emisión y acumulación.

En Guatemala, las fuentes principales de NO_2 están asociadas tanto a la actividad industrial (principalmente de la industria de generación eléctrica) como

a la quema de biomasa en diversas regiones del país. Sin embargo, debido a la falta de un sistema de monitoreo de calidad del aire que cubra todo el territorio, se desconocen muchos de los patrones de distribución y las tendencias de este gas. Se han realizado algunas mediciones puntuales en algunas cabeceras departamentales, sin embargo, no se han llevado a cabo estudios que abarquen la totalidad del país o que analicen de manera exhaustiva los ciclos estacionales de este contaminante.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la distribución espacial y las tendencias temporales del NO₂ en la atmósfera guatemalteca entre los años 2005 y 2021, utilizando los datos satelitales proporcionados por OMI. A través de este estudio, se busca identificar las principales fuentes de emisión y los puntos de acumulación, así como los ciclos estacionales y las tendencias interanuales en las abundancias de este gas, con el fin de contribuir a la generación de información que permita eventualmente implementar medidas de regulación y control de emisiones en el país.

El análisis se divide en tres regiones geográficas principales de Guatemala: la región sur, la región centro y la región norte. Estas regiones se seleccionaron debido a sus características particulares en términos de clima, geografía y nivel de industrialización y urbanización. La región sur, por ejemplo, alberga la mayor parte de la industria de generación eléctrica mediante biomasa y combustibles fósiles, lo que la convierte en una zona de especial interés para el estudio de las emisiones de NO₂. Por otro lado, la región norte, que incluye la selva de Petén, es propensa a incendios forestales durante la temporada seca, lo que también influye en la presencia de este gas.

El estudio utiliza series temporales de datos, que permiten analizar los patrones estacionales y las tendencias a largo plazo. A lo largo del periodo analizado, se ha observado una disminución general en las abundancias de NO₂ en todo el

territorio guatemalteco, aunque con variaciones significativas entre las diferentes regiones y épocas del año.

Los resultados obtenidos revelan patrones diferenciados de abundancia de NO_2 en el territorio guatemalteco, con la región sur mostrando las mayores abundancias de NO_2 , lo cual se encuentra asociado a la presencia de actividades industriales como la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles y la industria azucarera. En esta zona, la presencia de NO_2 es más alta durante la temporada seca, cuando la producción industrial se incrementa y las condiciones meteorológicas favorecen la acumulación de contaminantes en la tropósfera. Las abundancias de NO_2 en la región sur superan en más del doble a las registradas en las regiones centro y norte, lo que subraya la influencia directa de la actividad antropogénica en la calidad del aire de esta zona.

En contraste, las regiones central y norte muestran menor abundancia de NO_2 , con un comportamiento más influido por los factores climáticos que por la actividad industrial. La región norte, caracterizada por su baja densidad poblacional y su escasa actividad industrial, no muestra patrones claros de aumento en la abundancia de NO_2 , a pesar de los frecuentes incendios forestales que tienen lugar durante la temporada seca. Esto sugiere que, si bien los incendios contribuyen a la emisión de NO_2 , su impacto sobre la abundancia anual es limitado y no afecta significativamente la tendencia general.

A través de los mapas de distribución espacial generados durante este estudio se identificaron dos principales zonas de acumulación de NO_2 dentro del territorio guatemalteco: una en la costa sur del país, donde se concentra la actividad industrial, y otra en la reserva comunitaria de Chilascó, en el departamento de Baja Verapaz. Esta última zona presenta características atípicas, ya que no hay una fuente evidente de emisión de NO_2 , lo que resalta la

necesidad de estudios adicionales para entender los factores que generan la acumulación de este gas en esa área.

Finalmente, el análisis a largo plazo revela una ligera tendencia a la baja en la abundancia de NO₂ en el territorio guatemalteco, especialmente a partir de 2016. Este descenso puede estar vinculado a la reducción del uso de combustibles fósiles en la generación eléctrica, así como a la implementación de nuevas tecnologías renovables como la energía solar y eólica. No obstante, esta disminución no es uniforme en todas las regiones, lo que sugiere que las medidas de mitigación deben adaptarse a las características específicas de cada zona.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Dióxido de Nitrógeno

El Dióxido de Nitrógeno (NO_2) es un gas venenoso, de color marrón-rojizo y olor fuerte, que a nivel troposférico se encuentra en concentraciones traza [1]. Tiene su origen de forma natural en la quema de biomasa por incendios naturales, durante las tormentas eléctricas y por pequeñas emisiones de los suelos provocadas por la actividad microbiana [2].

Es uno de los principales gases que conforman la familia de los óxidos de nitrógeno (NO_x) en conjunto con el óxido nítrico (NO), juega un papel importante dentro de la química atmosférica, los ciclos biogeoquímicos y la eutrofización de los ecosistemas [2]. Afecta de forma indirecta el forzamiento radiativo por su participación en la formación de ozono troposférico (O_3), metano (CH_4) y material articulado ($\text{PM}_{2.5}$) [3]. Esto lo convierte en un gas de efecto invernadero (GEI) secundario, contribuyendo al cambio climático.

1.1.2. Dióxido de nitrógeno en la atmósfera y sus impactos

Existen numerosos impactos de la presencia del dióxido de nitrógeno en la atmósfera, cuando sus concentraciones se elevan por encima de las concentraciones normales. Algunos de estos impactos se describen a continuación:

1.1.2.1. Dióxido de nitrógeno y cambio climático

El cambio climático es una variación en el estado del clima que, por medio de herramientas estadísticas, puede ser identificada al medir la variabilidad y los estados promedio de sus propiedades por períodos largos (décadas o más) [4].

Los principales responsables del cambio climático son los gases de efecto invernadero existentes en la atmósfera. Estos gases, en pequeñas cantidades mantienen la temperatura del planeta (por medio del llamado efecto invernadero), permitiendo el desarrollo de la vida (sin ellos el planeta mantendría una temperatura aproximada de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), sin embargo, la actividad humana ha incrementado la concentración de estos GEI al punto de provocar un calentamiento global sin precedentes [4].

Existen gases de efecto invernadero directos (H_2O , O_3 , CH_4 , CO_2 , entre otros) y gases que son precursores de los GEI, denominados gases de efecto invernadero secundarios, entre los que se encuentra el NO_2 como uno de los principales.

La forma en la que el NO_2 impacta en el equilibrio atmosférico a nivel de la tropósfera depende de su concentración, la temperatura y la radiación solar. Así, durante el día puede formar ozono troposférico (implicado en el calentamiento global), en combinación con los compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés), y por la noche, ácido nítrico (HNO_3) [3,5,6], al unirse al vapor de agua que se encuentra en la atmósfera. En menor medida puede formar ácido peroxinitrico (HO_2NO_2) y ácido nitroso (HNO_2) [7]. El ácido nítrico puede precipitar en forma de lluvia ácida, destruyendo la vegetación, principal sumidero de dióxido de carbono (CO_2 , otro potente GEI), e incrementando la eutrofización de lagos y océanos.

Tanto por su aporte a la formación de GEI como por su capacidad de reducir los sumideros naturales de CO₂, el NO₂ es uno de los gases considerados como de alto impacto para el cambio climático.

1.1.2.2. Dióxido de nitrógeno y salud humana

Además de los impactos negativos que el NO₂ tiene para el cambio climático, es un gas que tiene serias consecuencias para la salud humana [3]. Forma parte del conjunto de gases de contaminación atmosférica, debido a su capacidad para formar aerosoles, que componen las partículas (PM_{2.5}), y que junto con el ozono troposférico componen el smog fotoquímico [8]. Es uno de los componentes de la contaminación del aire en interiores, incrementando la morbilidad y mortalidad en los seres humanos [8].

La Organización Mundial de la Salud (OMS por sus siglas en español) indica que la contaminación atmosférica es la responsable de cerca de dos millones de muertes prematuras en todo el mundo [9].

Exposiciones cortas al NO₂ pueden producir, entre otros, inflamación pulmonar, asma, disminución de la función respiratoria, bronquitis, cáncer de pulmón, problemas cardiovasculares e irritación en piel y ojos [8] [10].

1.1.2.3. Otros efectos del dióxido de nitrógeno en la atmósfera

En la agricultura, las altas concentraciones de NO₂ dan lugar a elevadas concentraciones de ozono troposférico, el cual reduce fuertemente la productividad de los cultivos y la lluvia ácida puede destruir los cultivos completamente [3].

El dióxido de nitrógeno puede formar partículas secundarias llamadas nitratos que provocan neblina y reducen la visibilidad. El dióxido de nitrógeno está implicado en la formación del smog fotoquímico, que reduce la visibilidad.

El dióxido de nitrógeno forma ácidos en presencia de humedad y estos pueden ser corrosivos para los materiales de construcción en altas concentraciones.

1.1.3. Origen del dióxido de nitrógeno en la atmósfera

A nivel global, se generan unos 50 Tg de óxido de nitrógeno por año, de los cuales el 23% es de origen natural, siendo el 58% originado por la quema de combustibles fósiles (principalmente para transporte y generación de electricidad), el restante 19% proviene de la quema de biomasa (para generación, industria, agricultura y cambio de uso del suelo), la agricultura (en pesticidas y fertilizantes) y los biocombustibles [2,11]. Estos valores de emisiones de origen antrópico se incrementan cada año en algunas regiones del mundo, mientras que en otras se mantienen estables gracias a las regulaciones sobre emisiones de NO_2 y contaminantes atmosféricos que manejan [12–15].

1.1.4. Eliminación del dióxido de nitrógeno en la atmósfera

Los procesos de eliminación del NO_2 de la tropósfera se pueden agrupar en dos: deposición húmeda, que incluye la eliminación del compuesto por medio de las lluvias, o la incorporación a las nubes para luego precipitar de igual forma con las lluvias; y la deposición seca, que se lleva a cabo por medio de la absorción, adsorción y adhesión [7]. La deposición seca depende de numerosos factores meteorológicos (temperatura, velocidad del viento, humedad, entre

otros) y la capacidad de la vegetación, el suelo y el agua para captar el compuesto.

Los procesos naturales de deposición del NO_2 se han incrementado durante los últimos 100 años, pasando de menos de 1 TgN/año alrededor de 1860, a 25 TgN/año cerca del año 2000 [16]. Estos procesos de deposición resultan, actualmente, insuficientes para evitar la elevación de su concentración en la atmósfera, como resultado de la enorme contribución antrópica.

1.1.5. Mediciones de dióxido de nitrógeno en atmósfera

Muchos países tienen sus propias regulaciones en cuanto a concentraciones máximas permitidas [17], otros, como Guatemala, no poseen una legislación ambiental que regule la calidad del aire, por lo que no cuentan con una definición de concentraciones límite propia del país. Sin embargo, el Sistema de Calidad del Aire del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) utiliza como referencia los límites de calidad del aire establecidos en la legislación de Estados Unidos a través de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) [18].

Además, en muchos países se cuenta con programas de monitoreo continuo de calidad del aire, con estaciones de monitoreo en tierra, que realizan mediciones sobre todos los gases contaminantes de la atmósfera para asegurar el cumplimiento de los límites permitidos [17]. La tabla 1 muestra los límites permitidos para varios contaminantes atmosféricos, de acuerdo con la EPA.

Tabla 1.

Límites de contaminantes atmosféricos establecidos por la EPA

Parámetro	Concentración	Período de medición
Dióxido de Azufre, SO ₂	30 ppb	Anual
	140 ppb	24 h
Partículas PM ₁₀	150 ug/m ³	24 h
Partículas PM _{2.5}	65 ug/m ³	24 h
Monóxido de Carbono, CO	9 ppm	8 h
	35 ppm	1 h
Ozono, O ₃	120 ppb	1 h
	80 ppb	8 h
Dióxido de Nitrógeno, NO ₂	53 ppb	Anual
	100 ppb	1 h

Nota. Estos son los límites de contaminantes atmosféricos establecidos por la EPA para los principales contaminantes atmosféricos. Así mismo son los valores utilizados para Guatemala [18].

1.1.6. Mediciones de dióxido de nitrógeno en Guatemala

Guatemala cuenta con un Programa de Monitoreo de Calidad del Aire para la República, dirigido por el INSIVUMEH. Este programa dispone de una red de monitoreo de calidad del aire que consiste en varias estaciones en tierra: una estación central de recolección de datos, ubicada en el Centro Nacional de Pronósticos (CNP), dentro de las instalaciones del INSIVUMEH, y 4 estaciones remotas. Las estaciones remotas son: Estación Radiosonda (Ciudad de Guatemala), Estación Labor Ovalle (Quetzaltenango), Estación Finca La Industria (Escuintla) y Estación Puerto Barrios (Puerto Barrios, Izabal) [19].

Estas estaciones se encuentran equipadas con instrumentos que podrían medir dióxido de nitrógeno (NO₂), óxido nítrico (NO), dióxido de azufre (SO₂),

monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}), además de monitorear las principales variables meteorológicas [19]. Sin embargo, a la fecha el Programa de Monitoreo de Calidad del Aire para la República de Guatemala no cuenta con los datos de concentración para dióxido de nitrógeno (o los demás gases contaminantes del aire) debido a que el equipo se encuentra en mantenimiento desde el 10 de diciembre de 2016 [19].

La Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), a través del Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, también realiza mediciones sobre calidad del aire, aunque lo hace únicamente para la Ciudad de Guatemala. Para llevar a cabo las mediciones utilizan un muestreo por difusión pasiva y análisis espectrofotométrico [20,21].

De acuerdo con Oliva y Taracena (2019), el promedio anual de concentración de NO₂ en Guatemala, rebasa el límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [21]. Si bien esto se ha obtenido en un solo sitio, este hallazgo es relevante para justificar el tener más mediciones en la ciudad capital o el territorio guatemalteco con el fin de confirmar esta observación y conocer la extensión espacial de la exposición a este compuesto. Sin embargo, esto solo resalta la necesidad e importancia de realizar mediciones de forma continua, que permitan conocer las condiciones actuales que eventualmente puedan ayudar a tomar decisiones sobre su regulación.

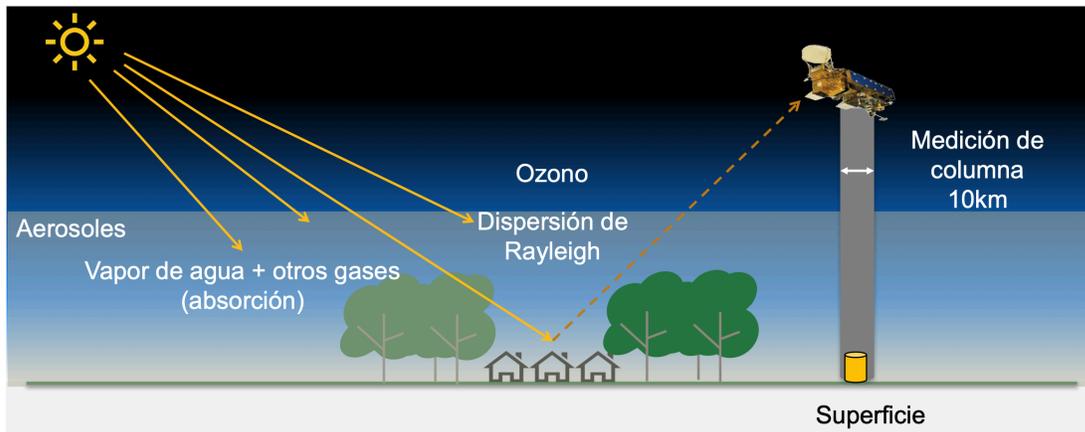
1.2. Teledetección Satelital

La teledetección satelital es una poderosa herramienta que permite la observación de la Tierra desde el espacio empleando sensores colocados a bordo de satélites. Este método emplea principios físicos fundamentales que involucran la interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera, la

superficie terrestre y los objetos en la superficie. Comprender estos principios es crucial para interpretar adecuadamente los datos recogidos y aplicarlos en diversas disciplinas como la meteorología, la climatología, la gestión ambiental, la agricultura, la cartografía, entre otras.

Figura 1

¿Qué miden los satélites?



Nota: Principios del funcionamiento de medición de los satélites pasivos. Tomado del NASA's Applied Remote Sensing Training Program [22].

El proceso de teledetección satelital comienza con la emisión de radiación electromagnética del Sol. Esta radiación atraviesa la atmósfera terrestre, donde interactúa con diferentes componentes atmosféricos entre los que se encuentran gases, aerosoles y nubes. La figura 1 ilustra los procesos básicos de la teledetección satelital. Estos componentes pueden absorber, dispersar o reflejar la radiación, afectando la cantidad y calidad de la radiación que finalmente llega a la superficie terrestre y es detectada por los sensores satelitales [23].

1.2.1. Propiedades Espectrales de los Objetos Terrestres

Cuando la radiación electromagnética alcanza la superficie terrestre, interactúa con los diferentes objetos a su paso y la cubierta terrestre. Cada objeto refleja, absorbe o transmite la radiación de manera diferente en función de sus propiedades espectrales únicas. Estas propiedades dependen del tipo de material, su composición química, su estructura y su rugosidad superficial. A manera de ejemplo, la vegetación absorbe radiación en la región del infrarrojo cercano mientras refleja en la región del rojo, lo que permite identificar y caracterizar diferentes tipos de vegetación mediante sensores remotos [24].

1.2.2. Sensores Remotos y Sistemas Satelitales

Los sensores remotos colocados a bordo de satélites se encuentran diseñados para captar la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra. Estos sensores pueden operar en diferentes rangos espectrales, que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo térmico, donde cada uno proporciona información valiosa sobre diferentes aspectos del medio terrestre que atraviesan. Los sistemas satelitales también incluyen plataformas de satélites, sistemas de transmisión de datos y estaciones terrestres por medio de los cuales se capta, procesa y distribuye la información recogida [25].

La teledetección satelital tiene una amplia gama de aplicaciones prácticas entre las cuales se encuentran: meteorología y la climatología, donde los datos de teledetección son cruciales para monitorear fenómenos atmosféricos como tormentas, huracanes y cambios climáticos a largo plazo; agricultura, para monitorear el crecimiento de los cultivos, detectar enfermedades y gestionar eficientemente el uso del agua y los fertilizantes; gestión ambiental, proporcionando datos sobre deforestación, urbanización y otros cambios en el

uso de la tierra que son críticos para la conservación y la planificación del uso del suelo [23].

1.2.3. Aplicación de Teledetección Satelital en el Estudio Atmosférico

La teledetección satelital ha revolucionado el estudio de la atmósfera terrestre al proporcionar una visión global y continua de sus componentes y fenómenos dinámicos. Utilizando sensores colocados a bordo de satélites, esta tecnología permite monitorear una amplia gama de variables atmosféricas entre las que se encuentran la composición química de la atmósfera (incluyendo gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos) [26]; estudiar la dinámica de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, tornados y olas de calor; evaluar el impacto del cambio climático en la atmósfera y sus interacciones con otros componentes del sistema climático global [27]; investigar el agotamiento y la recuperación de la capa de ozono estratosférico [28]; monitorizar el balance energético de la Tierra y sus efectos en los patrones climáticos regionales y globales [29].

1.2.4. Características de los satélites de observación atmosférica

Los satélites diseñados para la observación atmosférica están equipados con sensores e instrumentos especializados que operan en diferentes rangos espectrales y permiten medir una variedad de variables atmosféricas. Estos incluyen:

Espectrómetros y Radiómetros: Para medir la radiación solar incidente y reflejada, esenciales para estudiar el balance de energía de la Tierra y sus efectos en el clima [29].

Espectrómetros de Gases y Aerosoles: Para detectar y cuantificar la concentración de gases atmosféricos como el dióxido de carbono (CO₂), el ozono (O₃), el dióxido de azufre (SO₂) y aerosoles, que influyen en la calidad del aire y el clima [30,31].

Radiómetros de Temperatura y Humedad: Para medir perfiles verticales de temperatura y humedad atmosférica, cruciales para la predicción del tiempo y la climatología [28].

Lidar Atmosférico: Utilizado para estudiar la distribución vertical de aerosoles y nubes, así como para la detección de contaminantes y la investigación de la capa límite atmosférica [32].

1.2.5. Satélites y sus instrumentos para observación atmosférica

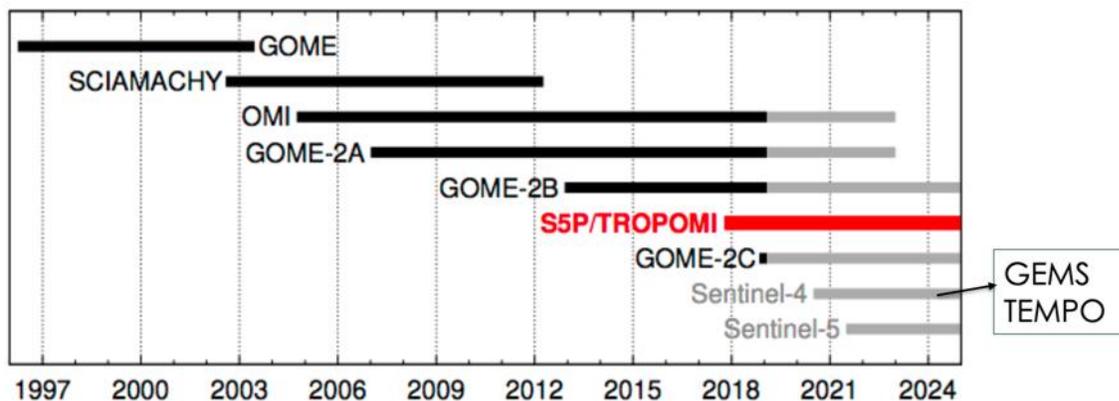
Existen varios satélites de investigación orbitando la Tierra, estos satélites realizan mediciones para tierra, agua y aire. Algunos de estos satélites, pertenecientes a la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), que poseen instrumentos de medición para estudiar la atmósfera son: Aqua, Aura, Calipso, ISS, Landsat 7, Landsat 8, OCO-2, SMAO, Suomi NPP y Terra (NASA, 2020). Estos satélites (y otros que no pertenecen a NASA) se encuentran equipados con múltiples instrumentos, entre los que se encuentran aquellos que pueden monitorear parámetros de calidad del aire y contaminación atmosférica.

En la figura 2 se muestran los principales instrumentos (en funcionamiento y por lanzar) que han registrado datos desde 1996 a la fecha, sobre calidad del aire.

Actualmente existen 4 instrumentos que pueden hacer mediciones de NO₂, estos son: OMI y TOPOMI (pertenecientes a la NASA y la ESA), y GOME y SCIAMACHY, pertenecientes a la Agencia Espacial Europea [22,33].

Figura 2

Instrumentos de medición de NO₂



Nota: Línea de tiempo del funcionamiento de algunos de los satélites de observación atmosférica. Fuente: Advanced Webinar: High Resolution NO₂ Monitoring From Space with TROPOMI [22].

1.2.6. Satélite Aqua

Instrumentos a bordo:

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Proporciona imágenes de alta resolución para la observación de la Tierra, incluyendo la atmósfera, la vegetación y la cobertura de nubes [34]

Atmospheric Infrared Sounder (AIRS): Mide perfiles verticales de temperatura y humedad atmosférica [34]

Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E): Detecta la distribución de vapor de agua y precipitación sobre la superficie terrestre [34]

Ozone Monitoring Instrument (OMI): Mide la abundancia de ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), aerosoles y otros gases importantes para la calidad del aire y el estudio de la atmósfera [26,34].

1.2.7. Satélite Terra

Instrumentos a bordo:

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Proporciona imágenes detalladas de la superficie terrestre y la atmósfera [35].

Multi-angle Imaging Spectro Radiometer (MISR): Estudia la distribución y la altura de nubes y aerosoles [35].

Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT): Mide monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en la troposfera [35]

Multi-angle Imaging Spectro Radiometer (MISR): Proporciona imágenes en diferentes ángulos para estudiar nubes y aerosoles [35]

1.2.8. Satélite Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership)

Instrumentos a bordo:

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS): Proporciona datos de alta resolución para monitorear incendios, temperatura superficial del mar y fenómenos meteorológicos [36].

Cross-track Infrared Sounder (CrIS): Mide perfiles verticales de temperatura y humedad, así como gases atmosféricos como el ozono y el dióxido de carbono [36]

Ozone Mapping Profiler Suite (OMPS): Mide la distribución y la concentración de ozono en la atmósfera [36]

1.2.9. Satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) Series

Instrumentos a bordo:

Advanced Baseline Imager (ABI): Proporciona imágenes en tiempo real de la Tierra y la atmósfera desde una órbita geoestacionaria [37]

Space Environment In-Situ Suite (SEISS): Monitorea las condiciones del espacio cercano a la Tierra, incluyendo el entorno solar y la radiación [37].

Solar Ultraviolet Imager (SUVI): Observa la radiación ultravioleta del Sol, esencial para estudiar su impacto en la atmósfera superior [37]

1.2.10. Satélite Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P)

Instrumentos a bordo:

Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI): Mide la columna de gases atmosféricos como dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y formaldehído (CH₂O) [38].

Cloud, Aerosol and Trace Gas Analyzer (CATS): Analiza aerosoles y nubes para estudiar su impacto en la atmósfera y el clima [38]

1.2.11. Instrumento de Monitoreo de Ozono -OMI-

El Instrumento de Monitoreo de Ozono (*Ozone Monitoring Instrument*, OMI por sus siglas en inglés) forma parte de los instrumentos de medición instalados en el satélite Aura, satélite dedicado a la observación de O₃, calidad del aire y clima, del programa de la NASA.

Este instrumento es una colaboración Alemán-Finlandesa que registra la radiación solar reflejada por la superficie terrestre en el rango del espectro visible y ultravioleta UV). Tiene una resolución espacial de 13x24 km aproximadamente, en el centro del barrido, siendo uno de los instrumentos a bordo de satélites con mayor resolución [39], solo superado por el instrumento, Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), lanzado a finales de 2017, con una resolución de 10 x 10 km [2,33].

OMI fue puesto en órbita el 15 julio de 2004, sigue una órbita polar, con un período de aproximadamente 100 minutos y 705 km de altura. Orbita la Tierra en conjunto con otros satélites como parte del Tren Vespertino (A-Train). Durante el año 2020 cumple 16 años de registrar datos (el mayor tiempo de registro de datos por satélite hasta ahora) [39].

Posee 3 detectores separados, que toman lecturas en diferente longitud de onda. El detector utilizado para medir NO₂ proporciona datos entre los 405 y los 465 nm en la región visible (VIS) [11,39].

El Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) es un instrumento de cooperación tripartita con la *European Space Agency* (ESA), y presenta mejoras, principalmente en cuanto a la resolución espacial, sobre el *European Global Ozone Monitoring Experiment*, (GOME), y el *Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography* (SCIAMACHY) [33,40]. La tabla 2 presenta las resoluciones espaciales de los instrumentos de medición de NO₂.

Debido a que OMI tiene mas tiempo de encontrarse registrando información sobre el NO₂ que TROPOMI (su sucesor formando parte de ESA), resulta mas apropiado para realizar análisis de series temporales, establecer estacionalidades y en general analizar la abundancia de NO₂ sobre una región.

Tabla 2.

Resoluciones espaciales de los instrumentos de medición de NO₂.

Instrumento	Tamaño de Píxel (largo y ancho) [cm²]
GOME	320 x 40 (15 x 40)
SCIAMACHY	60 x 30 (30 x 30)
OMI	24 x 13 to 160 x 28 (12 x 13)
GOME-2	80 x 40 (13 x 40)

Nota: Resoluciones espaciales de los principales instrumentos de medición de NO₂ a bordo de los satélites de NASA [40]

OMI proporciona la información obtenida en 4 niveles de procesamiento que van desde el nivel 1, donde los datos se encuentran totalmente sin procesar y solamente tienen referencia temporal, hasta el nivel 4, que ofrece datos combinados con modelos e información proveniente de otras fuentes [22].

Para realizar análisis sobre la abundancia de NO₂ los datos mas recomendados son los de nivel 2 o nivel 3. En el nivel 2 los datos se encuentran

transformados a cantidades geofísicas, georreferenciadas y calibradas de acuerdo al instrumento del cual provienen. En el nivel 3, los datos se obtienen en una rejilla espaciotemporal uniforme y han pasado por un proceso de control de calidad [22].

OMI reporta la abundancia para el NO₂ (en moléculas/cm²), midiendo la columna vertical existente entre la superficie de la Tierra y el satélite. También proporciona información sobre la abundancia de la columna troposférica (entre 10 y 12 km de altura de columna sobre la superficie terrestre).

Esta última resulta especialmente útil para medir abundancias de NO₂ y determinar sus fuentes de emisión, ya que éstas se encuentran principalmente a nivel de la superficie terrestre y los tiempos de vida del gas hacen que el NO₂ se concentre principalmente alrededor de dichas fuentes (con cierta influencia debido a las condiciones meteorológicas de la zona, principalmente de los niveles de precipitación, direcciones y velocidades de vientos) [41]. Las concentraciones de NO₂ encontradas por encima de la tropósfera varían conforme a los valores encontrados en la tropósfera en mas de dos órdenes de magnitud [41].

La principal limitación de OMI para la lectura de NO₂ es la cantidad de nubes que se encuentren sobre el territorio al momento del paso del satélite, que impiden la medición precisa de la radiación reflejada de la tierra, pues absorben parte de esta, por lo que las mediciones en la estación con mayor nubosidad, resultan mas complicadas.

Desde hace muchos años se emplean datos satelitales para observar tendencias sobre las concentraciones de contaminantes atmosféricos [2].

Países de la Comunidad Europea, India, China, Rusia, Estados Unidos han realizado exitosamente estudios de monitoreo y análisis de la abundancia de NO₂ en su territorio, por medio de OMI [13–15,42].

La detección remota satelital y en particular OMI, han demostrado que pueden proporcionar información valiosa para apoyar la investigación sobre la calidad del aire en diversas partes del mundo [11]. En Guatemala puede ser un recurso importante, que permita comenzar a generar información para todo el país, resultando una alternativa viable para el monitoreo del NO₂ y otros gases en regiones que no cuentan con detectores en tierra.

1.2.12. Evaluación de calidad para los datos provenientes de OMI

La calidad de versión actual de los datos disponibles para OMI en las Plataforma de EarthData es actualmente establecida por medio de mediciones independientes en campañas de validación en curso, utilizando instrumentos basados en tierra, aviones y satélites. El error de ajuste en la columna oblicua de NO₂ se encuentra estimado entre 0.3 y 1×10^{15} moléculas cm⁻², antes de la anomalía de la fila (RA, por sus siglas en inglés).

En comparaciones preliminares entre las columnas estratosféricas de NO₂ recuperadas se ha encontrado un aumento general inferior al 10%, al ser comparadas con la versión 1. La variación estacional del NO₂ estratosférico medido con OMI concuerda con el modelo de transporte químico GMI de la NASA GSFC. Existiendo un sesgo absoluto de hasta un 25%, que es consistente con los sesgos conocidos del modelo [43].

Las columnas troposféricas de NO₂ recuperadas han sido comparadas con mediciones de NO₂ basadas en tierra, in situ, y con inventarios de emisiones de abajo hacia arriba. Los estudios preliminares de validación indican que los

diferentes conjuntos de datos coinciden de forma aceptable, considerando las múltiples diferencias entre ellos [43] .

1.2.13. Procesamiento de Datos y Aplicaciones

Una vez capturada la radiación por los detectores satelitales, los datos se procesan para generar imágenes, mapas y perfiles atmosféricos. Estos datos son utilizados en una variedad de aplicaciones, incluyendo:

Monitoreo de la Calidad del Aire: Seguimiento de la abundancia de contaminantes atmosféricos como aerosoles y gases nocivos [44].

Predicción del Tiempo: Mejora de modelos meteorológicos mediante la observación de patrones atmosféricos y cambios en la temperatura y humedad [45]

Estudios Climáticos: Evaluación de tendencias a largo plazo en la atmósfera para comprender mejor el cambio climático y sus impactos [45]

Desafíos y Avances Tecnológicos

A pesar de los avances en la tecnología de detección remota, existen desafíos persistentes como la calibración precisa de los instrumentos y la corrección de errores sistemáticos. Los desarrollos recientes han incluido mejoras en la resolución espacial y temporal de los satélites, así como la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial para el análisis automatizado de datos [45]

1.2.14. OMI y la absorción por NO₂

El NO₂ absorbe radiación en varias longitudes de onda, principalmente en el ultravioleta visible (UV-Vis) y en el infrarrojo cercano (NIR).

Las bandas de absorción de NO₂ son fundamentales para su detección y monitoreo atmosférico.

La banda de absorción correspondiente al ultravioleta visible UV-Vis, se encuentra bien definida en el rango de 300-450 nm, donde la radiación solar es intensa. Esta absorción es utilizada por satélites para mapear la distribución y concentración vertical de NO₂ en la atmósfera. La banda de absorción correspondiente al infrarrojo cercano (NIR) para el NO₂, absorbe radiación en longitudes de onda alrededor de 450-800 nm. Esta absorción es menos intensa que en el UV-Vis pero contribuye a la caracterización de la capa límite atmosférica y la contaminación urbana [12,46].

1.2.15. Emisión por NO₂

La emisión de radiación por NO₂ se da principalmente en el infrarrojo lejano, como resultado de la excitación térmica de las moléculas en la atmósfera. Esta emisión es menos pronunciada en comparación con gases como el CO₂ o el vapor de agua, pero puede detectarse a través de instrumentos sensibles a longitudes de onda específicas:

Emisión Infrarroja Lejana: NO₂ emite radiación en longitudes de onda más largas, alrededor de 10 μm y más allá, como parte del espectro infrarrojo lejano. Esta emisión es utilizada en estudios de temperatura atmosférica y en la evaluación de la composición química de la atmósfera [47].

1.2.16. Aplicaciones en la Observación Atmosférica

El monitoreo de NO₂ desde satélites es crucial para varias aplicaciones científicas y ambientales:

Calidad del Aire: El NO₂ es un indicador importante de la contaminación atmosférica urbana y del tráfico vehicular. Su monitoreo continuo permite evaluar la calidad del aire y las políticas de mitigación de la contaminación [12].

Química Atmosférica: La distribución y variabilidad temporal de NO₂ proporciona información sobre los procesos químicos en la atmósfera, incluyendo la formación de ozono troposférico y la producción de aerosoles [48].

Cambio Climático: Como gas de efecto invernadero indirecto, NO₂ contribuye al calentamiento global y al cambio climático a través de su interacción con otros gases y partículas en la atmósfera [49].

1.3. Descripción Geográfica De Guatemala

1.3.1. Guatemala, contexto regional y nacional

Guatemala se encuentra ubicada en la región centroamericana, entre los 14° y los 18° de latitud norte y los 88° y 92° de longitud oeste. Tiene fronteras al norte con México (960 km), al oeste con Belice (266 km), al este con el Mar Caribe (148 km) y Honduras (256 km), al sudoeste con El Salvador (203 km) y al sur con el Océano Pacífico (254 km). Tiene una extensión de 108,889 km² (aproximadamente) y su relieve es montañoso, con excepción de la costa sur y las tierras del norte, que son principalmente planas [50,51].

Centroamérica es una región principalmente tropical, con temperaturas elevadas y una amplia diversidad climática. Guatemala, en particular, posee múltiples micro climas y amplia variabilidad climática [52]. La temperatura media de la ciudad capital es de 18°C. Mientras que la temperatura media máxima se sitúa en 24.8°C y la media mínima en 12.9°C [51]. Hacia las costas tiende a ser tropical, cálido y húmedo. La región montañosa posee clima principalmente frío, con mayor frecuencia y abundancia de precipitaciones [53].

El clima de Guatemala se encuentra altamente influenciado por los regímenes de vientos del norte, con aportes de humedad provenientes del mar Caribe y del Golfo de México, así como los vientos del suroeste, con aportes de humedad del océano Pacífico [53].

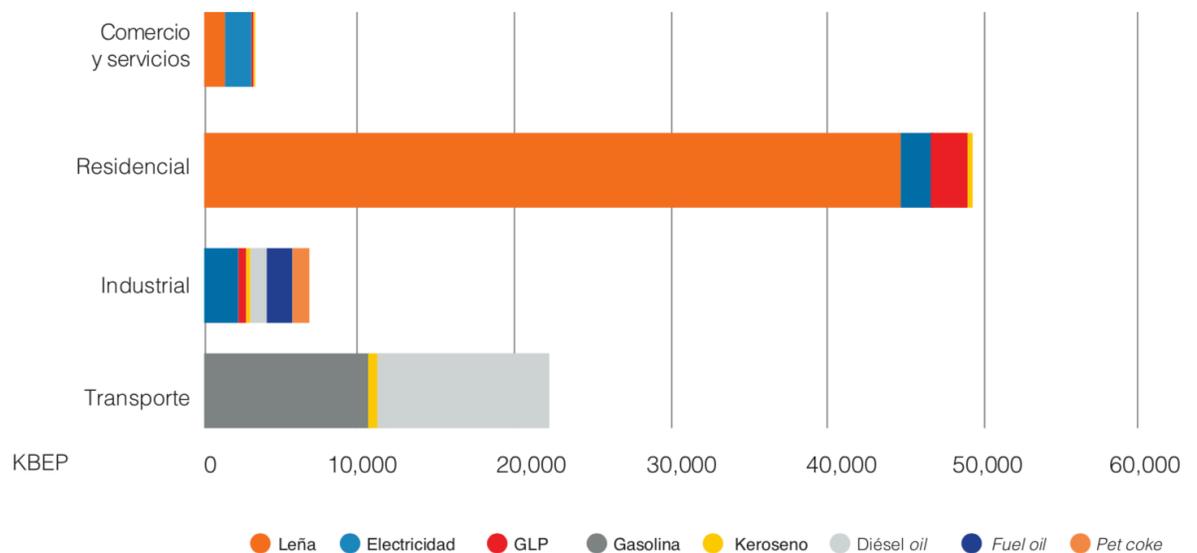
El país presenta dos estaciones: La época seca, que va de noviembre a abril, comenzando con temperaturas bajas, debidas a las masas de aire frío provenientes de la zona polar, y terminando con temperaturas altas hacia finales de la estación; y la época lluviosa, que va de mayo a octubre. Durante el mes de julio y parte de agosto (ambos dentro de la época lluviosa) suele tener lugar un corto período seco denominado canícula [53].

Guatemala presenta algunas características que podrían hacer que sus emisiones de gases, entre ellos el NO₂, vayan en aumento de manera constante, entre ellas el rápido crecimiento poblacional, la explotación masiva de los recursos naturales, cuyas causas principales son el cambio de uso de suelo para agricultura y ganadería (el 24% del PIB responde a la agricultura), la pérdida masiva de bosques y la expansión urbana e industrialización (generación de energía eléctrica, cultivo de azúcar, aceite de palma), entre otros [52–54].

Las fuentes antropogénicas de NO₂ en Guatemala se encuentran principalmente en el uso de biomasa y combustibles fósiles, tanto como fuente de energía primaria como para la generación de energía eléctrica, como puede apreciarse en la figura 3, donde el consumo de madera para cocción y calefacción por parte del sector residencial es el principal en el país, seguido por el consumo de gasolina y diésel para transporte [54]

Figura 3

Consumo de combustibles en Guatemala



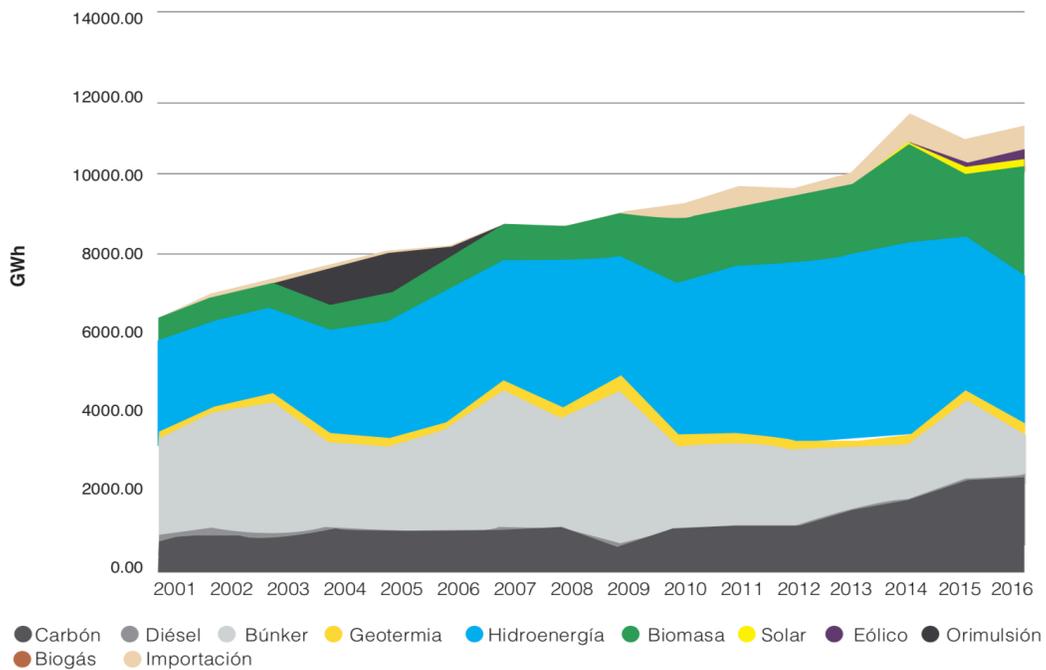
Nota: Consumo de combustibles en Guatemala, por sector de consumo y tipo de combustible [54].

La generación de NO₂ en Guatemala no se limita exclusivamente al parque vehicular en las ciudades o al consumo residencial de leña en el interior del país. Guatemala genera parte de su energía eléctrica con carbón y combustibles fósiles. De acuerdo con la Universidad Rafael Landívar, cerca del 30% de la generación eléctrica se realiza con combustibles fósiles, como se observa en la

figura 4 [54]. Así mismo, presenta una alta tasa de incendios forestales durante la época seca [55], además de quema de biomasa por actividades agronómicas y zafra [56]. Todas estas actividades contribuyen directamente a elevar la cantidad de NO₂, a nivel de la tropósfera sobre el territorio guatemalteco, por lo que resulta importante evaluar cual es la concentración actual, cual ha sido la tendencia de los últimos años y el comportamiento estacional.

Figura 4

Generación de energía eléctrica en Guatemala



Nota: Generación de energía eléctrica en Guatemala a partir del tipo de combustible utilizado para generar [54,57]

2. METODOLOGÍA

2.2. Determinación de variables espacio y tiempo

2.2.1. Período de estudio.

Se estableció un período de estudio de 17 años, comprendidos entre 2005 y 2021, teniendo en cuenta las características y disponibilidad de los datos provenientes de OMI, ya que OMI comenzó lecturas en octubre de 2004.

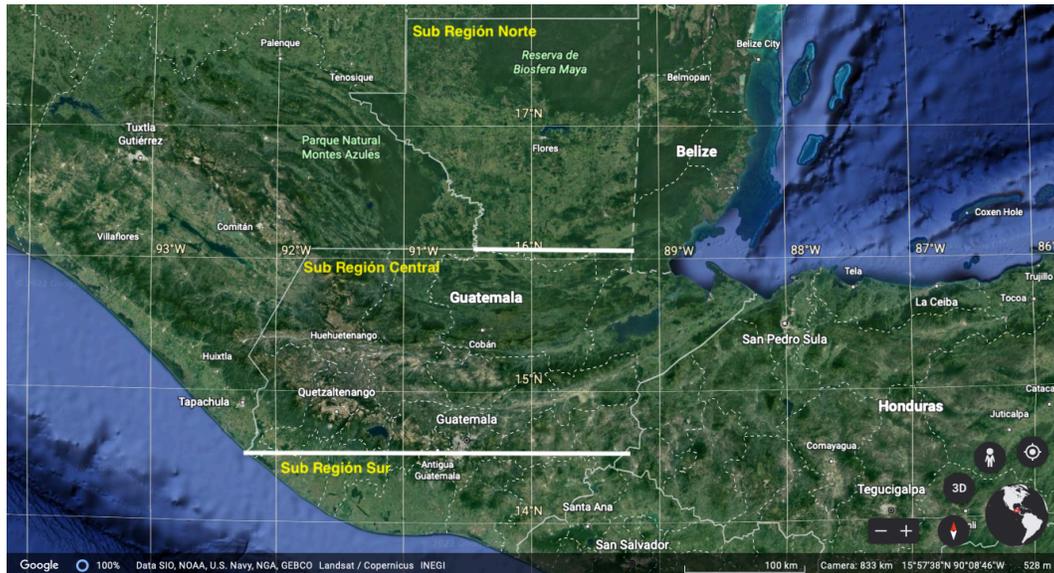
2.2.2. Área de estudio

El estudio se realizó sobre la totalidad del territorio guatemalteco, empleando únicamente los datos correspondientes al área comprendida dentro de sus límites geográficos (figura 5) [58].

Para un mejor análisis del comportamiento de las abundancias de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, se dividió el área de estudio en tres regiones, de acuerdo a sus características climáticas, geográficas, urbanas y de industrialización, entre otros, de la forma siguiente:

Figura 5

Separación del territorio de Guatemala por regiones de trabajo



Nota: Mapa del territorio guatemalteco, incluye la separación en las tres regiones (sur, centro y norte), empleada en este estudio. Mapa obtenido con *Google Earth* [59] [58].

2.2.3. Región Sur

Zona baja y costera que comprende la parte sur del país y parte de la región oriental. Es una región principalmente plana, con temperaturas altas y clima tropical [50,52]. En esta zona se concentra la mayor parte de la industria de generación de energía eléctrica por medio de biomasa y combustibles fósiles [54,60]. La vegetación se encuentra fuertemente modificada por el cultivo de caña de azúcar, que también se encuentra concentrado exclusivamente en esta sub región del país [60–62].

2.2.4. Región Centro

Constituye la franja media del país, desde la frontera occidental (frontera con México) hasta la frontera oriental (frontera con Honduras y El Salvador). Esta región contiene las principales ciudades del país, así como las principales cadenas montañosas y bosques nubosos del territorio. Presenta una amplia variedad de micro climas, que van desde la Región de Valles de Oriente, con altas temperaturas, hasta la Franja Transversal del Norte, con climas más bien fríos, pasando por el Altiplano Central y la región Caribe [52]. En esta región se lleva a cabo la mayor parte del desarrollo urbano del país, así como las principales actividades industriales que no pertenecen a la industria de generación de electricidad. La generación eléctrica que se lleva a cabo en esta región es principalmente de tipo hidroeléctrico [57,60].

2.2.5. Región Norte

Abarca exclusivamente el departamento de Petén. Es una región mayormente plana, poco poblada y poco industrializada, con grandes extensiones de vegetación que corresponde a selva tropical y grandes extensiones dedicadas a la agricultura y la agronomía. El clima es principalmente tropical, con abundantes precipitaciones [52]. Esta región carece casi en su totalidad de industria de generación eléctrica [57,60].

2.3. Tratamiento de datos

2.3.1. Origen de los datos

Los datos utilizados en este estudio se obtuvieron de la plataforma Giovanni [63] y corresponden a los datos en columna troposférica para el NO₂,

con un filtro de nubosidad del 30%, provenientes del detector OMI, a bordo del satélite AURA. Las abundancias de NO₂ se encuentran medidas en moléculas/cm². Se trabajó únicamente con los datos correspondientes al período y región delimitados [58].

Las series de datos fueron descargadas y trabajadas de manera individual para cada una de las sub regiones de trabajo propuestas (descritas previamente), así como para el territorio guatemalteco completo [58].

Durante el procesamiento de los datos se eliminaron los valores negativos, llevando a cabo una normalización de los mismos. Posteriormente se procedió a completar los datos para aquellas fechas en las cuales, por defecto de medición, no se tiene un valor de dato válido disponible. Este proceso se llevó a cabo por medio de interpolación lineal.

Para llevar a cabo el análisis de las series temporales obtenidas a partir de OMI, los datos fueron descompuestos de manera que se generara información sobre sus componentes de periodicidad, tendencia, y estacionalidad.

Habiendo obtenido la duración de los ciclos principales, se procedió a establecer las tendencias y distribuciones en la abundancia de NO₂, para estos períodos.

El análisis de frecuencias de las series temporales se realizó por medio de la transformada rápida de Fourier.

Se obtuvo promedios anuales de la abundancia de NO₂ sobre todo el territorio guatemalteco y para las tres sub regiones de estudio de forma individual,

con el fin de analizar las tendencias, tanto para la época seca como para la época lluviosa [58].

Se elaboraron mapas con la distribución espacial de NO_2 sobre todo el territorio guatemalteco, para determinar los puntos de generación/acumulación del gas.

Todo el tratamiento de datos se llevó a cabo empleando MATLAB 2022a [64].

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Periodicidad

El primer aspecto analizado fue la frecuencia de repetición de los patrones de abundancia de NO₂ dentro del área y período de estudio. Para esto se emplearon los 17 años de datos provenientes de OMI, centrando el análisis en aquellas periodicidades inferiores a un año [58].

Se obtuvo dos períodos principales para la serie temporal estudiada, el primario de 364 días, el cual corresponde con la periodicidad anual analizada; y el secundario de 182 días, que coincide con la duración de las épocas seca y lluviosa (estacionalidad) en Guatemala [58].

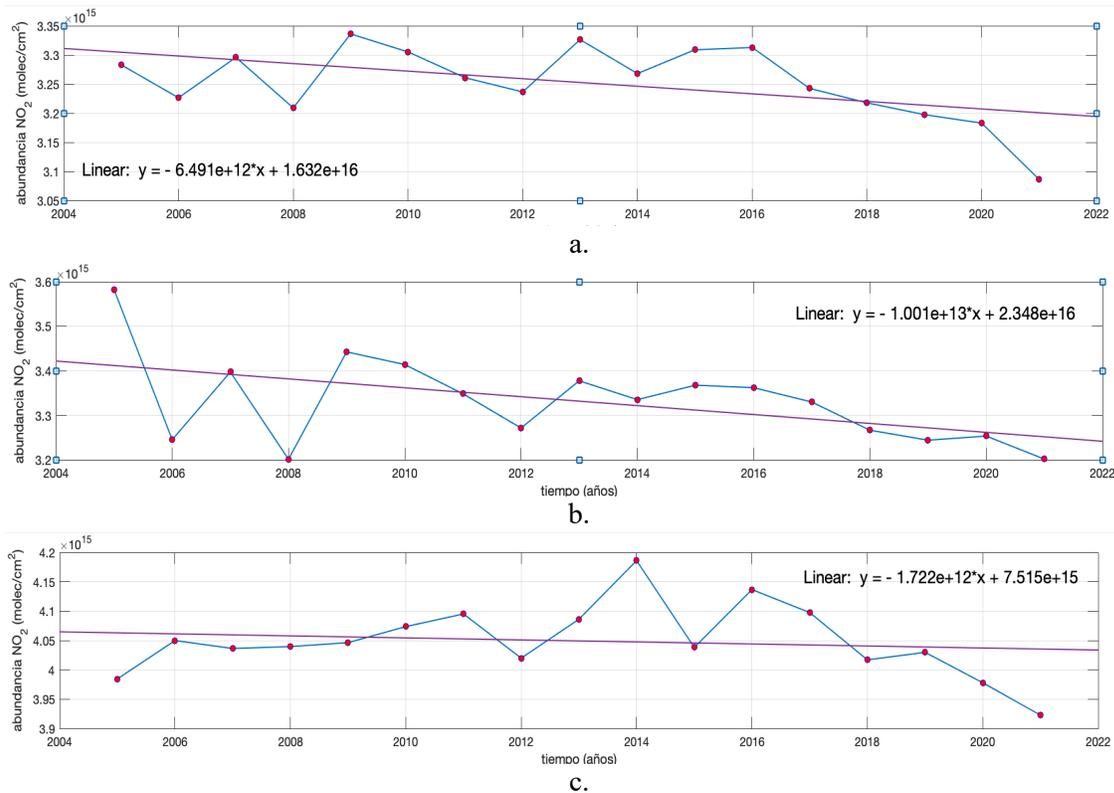
3.2. Tendencia temporal general de NO₂

La figura 6a ilustra la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de NO₂ a lo largo del período estudiado. La abundancia promedio de NO₂ se ha reducido ligeramente a lo largo del período de estudio, se advierte también una variabilidad significativa entre los promedios anuales [58].

Tanto para la época seca como para la época de lluvia (figuras 6a y 6b) se observa la misma tendencia a la reducción en la abundancia del dióxido de nitrógeno en todo el país, siendo mas marcado hacia los últimos años del período de estudio.

Figura 6

Abundancias medias anuales de NO₂ y tendencias para el territorio de Guatemala



Nota: **a.** Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para el territorio de Guatemala, entre 2005 y 2021; **b.** Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la época seca, para el territorio de Guatemala, entre 2005 y 2021; **c.** Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la época lluviosa, para el territorio de Guatemala, entre 2005 y 2021. Elaboración propia con Matlab. [58].

Puede observarse una mayor claridad en la tendencia a la baja, hacia el final del período de estudio, a partir del año 2016 aproximadamente. Esta reducción puede estar relacionada con la variación en la matriz de generación eléctrica de Guatemala debido al incremento en la generación a partir de fuentes renovables (hidroeléctrica principalmente), y la incorporación al parque de generación eléctrica de nuevas tecnologías (solar-foto voltaica y eólica) que tiene

lugar durante 2015 y que ha mantenido un crecimiento constante desde esa fecha, así como la reducción del uso de bunker para generación eléctrica (un 69% para el año 2019 en comparación con lo consumido durante 2016), debido al alza de los precios en el mercado internacional [65].

Cuando se realiza la separación del territorio guatemalteco en las tres regiones de estudio pueden observarse algunos comportamientos muy particulares de cada región. Estos comportamientos particulares son asociados inicialmente con las características particulares de la actividad antropogénica en dicha región [58].

3.3. Región sur, tendencia temporal de NO₂

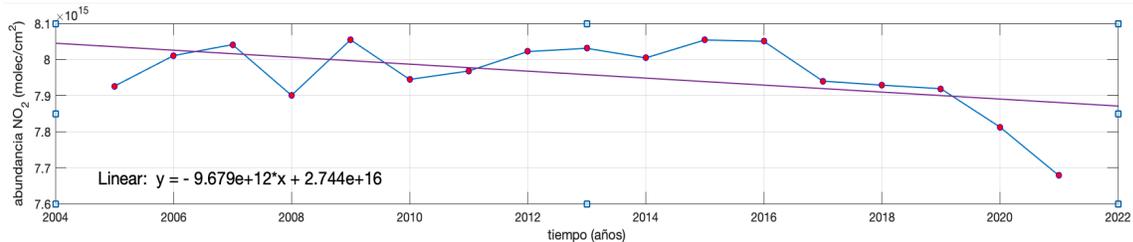
La figura 7a presenta la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de NO₂ a lo largo del período estudiado, para la región sur, que corresponde a las tierras bajas y de costa, al sur de Guatemala.

Es destacable que, mientras las abundancias de NO₂ para todo el territorio de Guatemala se encuentran alrededor de los 3.0×10^{15} - 3.35×10^{15} moléculas/cm² (figura 7a), en el caso de la región sur se encuentran entre 7.65×10^{15} y 8.10×10^{15} moléculas/cm². Esto indica claramente que existe mayor abundancia de NO₂ sobre toda la región sur, que en el resto de país.

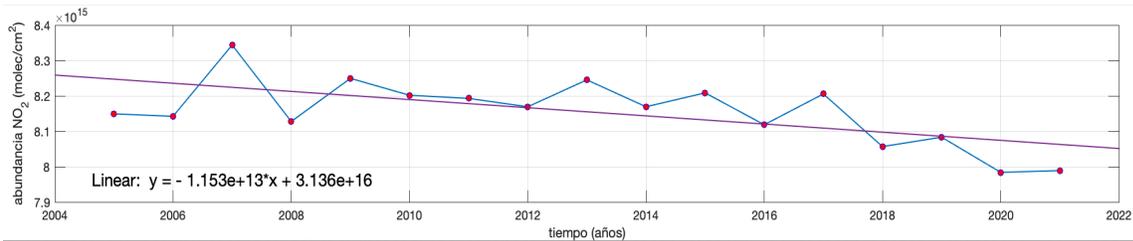
Esta diferencia en la abundancia del dióxido de nitrógeno disponible en la tropósfera se debe, en buena medida, a la concentración de actividades antropogénicas con emisiones de este gas, que tiene lugar en esta región, ya que es en la costa sur del país donde se encuentra principalmente la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles e industria azucarera) [60].

Figura 7.

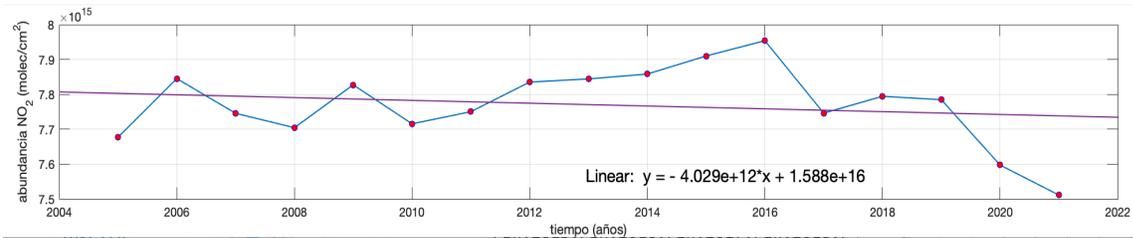
Abundancias medias y tendencias para la región sur de Guatemala, para el NO₂



a.



b.



Nota: **a.** Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región sur de Guatemala, entre 2005 y 2021; **b.** Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región sur de Guatemala, durante la época seca, entre 2005 y 2021; **c.** Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región sur de Guatemala, durante la época lluviosa, entre 2005 y 2021. Elaboración propia con Matlab [58].

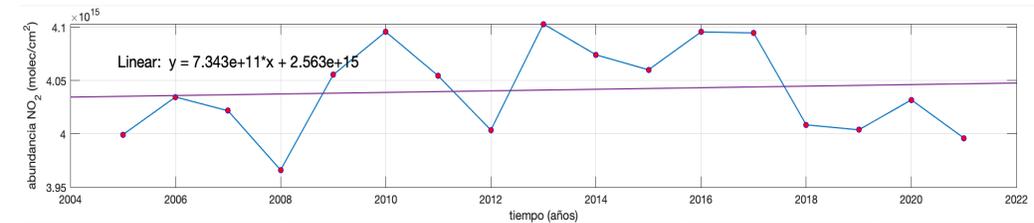
Puede observarse una mayor abundancia de NO₂ sobre la región, durante la temporada seca (figura 7b), al comparar contra la temporada lluviosa (figura 7c). Durante la temporada seca, se incrementa la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, al reducirse la capacidad de generación de las

hidroeléctricas [54,60]. Es también en temporada seca que se lleva a cabo la zafra y el empleo del bagazo de caña para cogeneración [61,62,65].

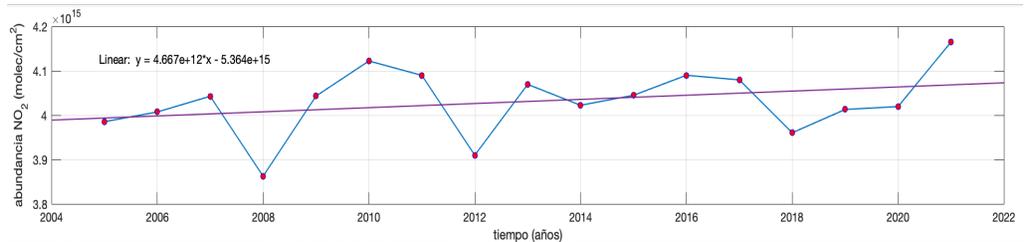
3.4. Región central, tendencia temporal de NO₂

Figura 8.

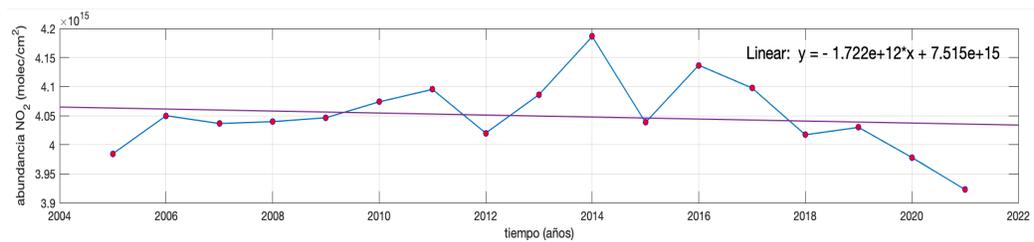
Abundancias medias y tendencias para la región central de Guatemala, para el NO₂



a.



b.



c.

Nota: a. Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región central de Guatemala, entre 2005 y 2021; b. Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región central de Guatemala, durante la época seca, entre 2005 y 2021; c. Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región central de Guatemala, durante la época lluviosa, entre 2005 y 2021. Elaboración propia con Matlab [58].

La figura 8a presenta la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de NO₂ a lo largo del período estudiado para la región central. Como puede verse, la abundancia de NO₂ se está incrementando, aunque muy lentamente. Al analizar por separado la temporada seca y la lluviosa, (figuras 8b y 8c), se observa que el incremento es persistente durante la temporada seca, sin embargo, durante la temporada lluviosa la tendencia se invierte, reduciéndose la abundancia de NO₂ [58].

Es posible que este incremento observado durante la temporada seca (que influencia el comportamiento anual general de la región) sea producto del desplazamiento de parte del NO₂ generado en la región sur, provocado por la circulación natural de la atmósfera. Otra posibilidad es que este incremento sea influenciado por el crecimiento de la industria y el transporte en las ciudades principales. Este incremento en la generación de NO₂ influenciaría el comportamiento de la región en temporada seca y en temporada lluviosa se invertiría debido a la fuerte influencia de la meteorología de la zona. Sin embargo, es necesario realizar estudios mas completos sobre las emisiones y acumulaciones en esta zona, para determinar cual es el origen de este comportamiento.

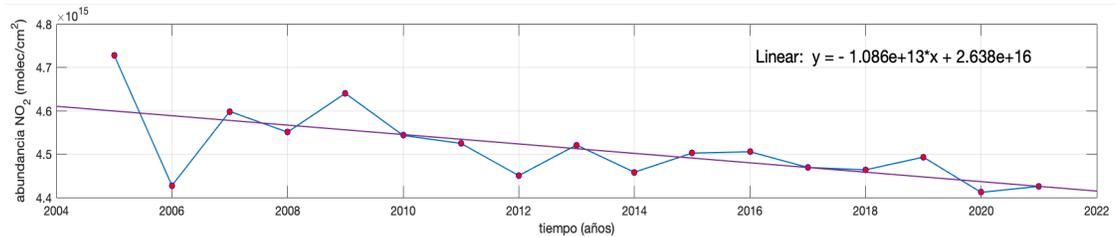
3.5. Región norte, tendencia temporal de NO₂

La figura 9a presenta la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de NO₂ a lo largo del período estudiado, para la región norte, que corresponde a la región de Petén. Puede observarse que los rangos de abundancia de NO₂ en esta región, así como sus tendencias anuales, son muy similares a los existentes en la región central y muy similares también a los que se observan en el comportamiento del territorio guatemalteco completo, no así para las abundancias y tendencias encontradas en la región sur. Esta variación

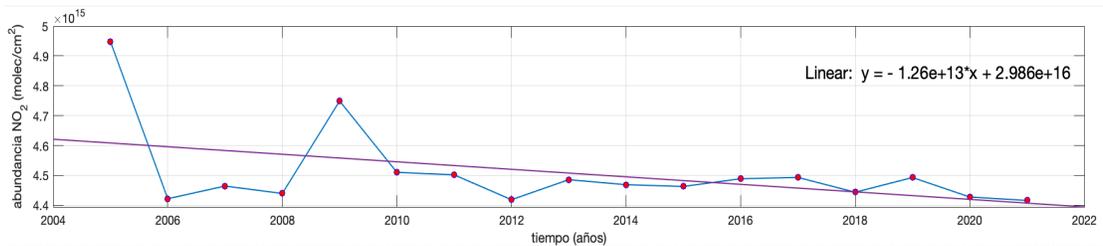
parece indicar que aunque las abundancias y tendencias de la región sur son significativamente diferentes del resto del país, no son suficientes para modificar la tendencia general y abundancias generales de la región completa [58].

Figura 9.

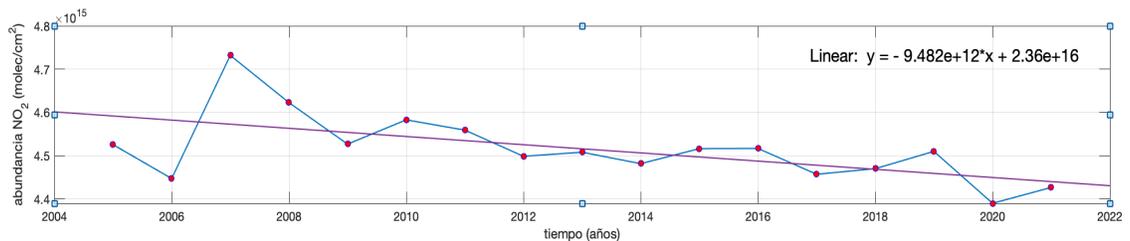
Abundancias medias y tendencias para la sub región norte de Guatemala, para el NO₂



a.



b.



c.

Nota: a. Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región norte de Guatemala, entre 2005 y 2021; b. Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región norte de Guatemala, durante la época seca, entre 2005 y 2021; c. Abundancia media anual de NO₂ y tendencia, para la región norte de Guatemala, durante la época lluviosa, entre 2005 y 2021. Elaboración propia con Matlab [58].

También se observa que los rangos entre los cuales se encuentran las abundancias de NO₂ para la época seca (figura 9b) y la época lluviosa (figura 9c) son muy similares, por lo que, a pesar de ser una zona con alta incidencia de incendios durante la temporada seca (un aproximado de 251,569 hectáreas afectadas por el fuego entre 2001 y 2019) [66,67] estos incendios no influyen de forma significativa en el promedio anual de la región.

Es posible que esto se deba a que la mayor parte de incendios se concentran principalmente en los meses de marzo y abril (los meses mas cálidos del año) y resultan casi inexistentes durante la época lluviosa y la porción fría de la época seca [67].

3.6. Distribución espacial de NO₂

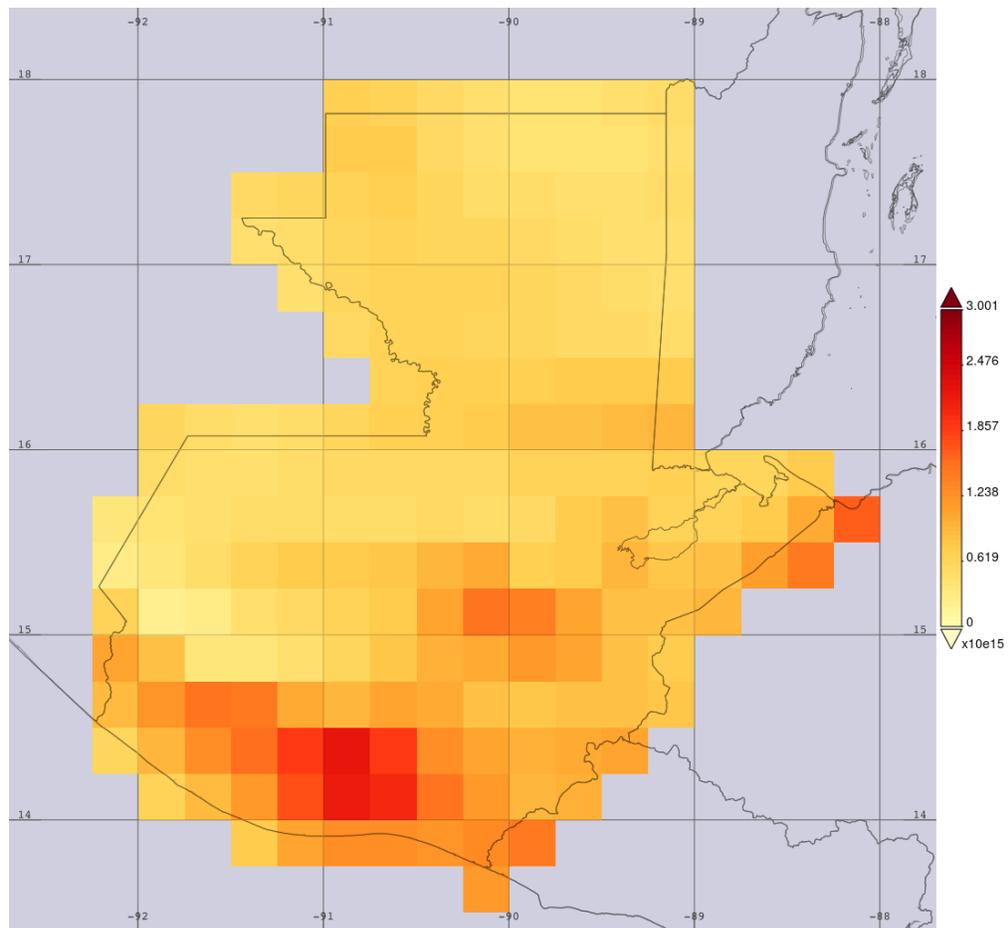
La figura 10 muestra un mapa con la distribución espacial de NO₂ en el país, a lo largo de todo el período de estudio. En este mapa puede apreciarse con claridad la existencia de dos zonas de generación/acumulación (*hot spots* en inglés) de NO₂ dentro del territorio guatemalteco.

La primera y mas grande de estas zonas de generación/acumulación se encuentra al sur del país, en la región de la costa, siendo los departamentos de Escuintla y Santa Rosa donde se ubica la mayor abundancia de NO₂, extendiéndose por toda la costa del Pacífico desde la frontera con México hasta la frontera con El Salvador. Es en esta región donde se encuentran las principales fuentes de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles (carbón y bunker), así como las principales cogeneradoras de energía eléctrica (a partir de biomasa) [57,60]. Esta región es también el área de cultivo de caña de azúcar. Ambas actividades económicas son fuente principal de emisiones de dióxido de nitrógeno [54], permitiendo asumir entonces que la abundancia de

NO₂ en la atmósfera, en esta región, esta fuertemente influenciada por la actividad humana.

Figura 10.

Distribución espacial de abundancias de NO₂ sobre el territorio guatemalteco.



Nota: Distribución espacial de NO₂, en moléculas/cm², durante el período comprendido entre 2005 y 2021, para el territorio guatemalteco. Elaboración propia por medio de Giovanni [63] [58].

La segunda área de generación/acumulación de NO₂ corresponde la Chilascó, ubicada a 156.5 kilómetros de la capital, en dirección noreste, en el departamento de Baja Verapaz. Forma parte de la zona de amortiguamiento y zona núcleo de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas. Es considerada

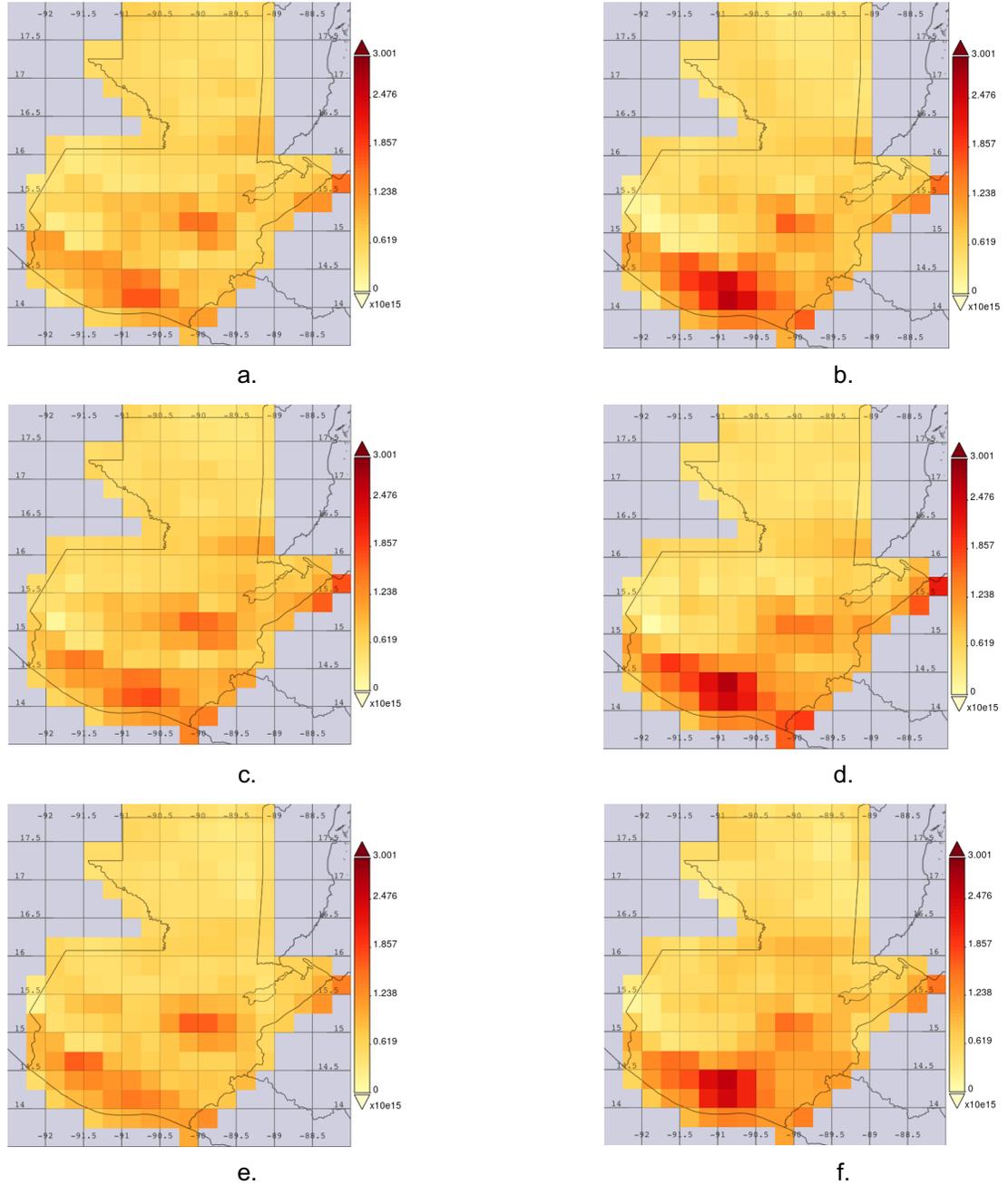
una reserva Natural comunitaria [68,69]. Además de ser preservada como reserva de bosque nuboso, dedica aproximadamente un 2% de su superficie al cultivo de brócoli para exportación [68].

Dado que en esta zona no existe mayor desarrollo urbano e industrialización, y que el uso que se da al suelo pareciera no aportar cantidades importantes de emisiones de NO_2 , se desconoce el origen de esta acumulación del gas sobre su tropósfera. Sin embargo, existen compuestos volátiles biogénicos (COVB) que pueden interferir en la determinación de NO_2 por medio de satélites. La interferencia de estos COVB en las mediciones de abundancia del NO_2 representa un desafío significativo debido a las bandas de absorción superpuestas en el espectro ultravioleta y visible. Este solapamiento dificulta la distinción precisa entre las señales de ambos tipos de compuestos, lo que puede generar errores en las estimaciones de abundancias para el NO_2 . Los principales COVB que pueden contribuir a esta interferencia incluyen isopropeno, monoterpenos, sesquiterpenos y productos secundarios como aldehídos y cetonas, que participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas que pueden producir compuestos adicionales con propiedades espectrales similares al NO_2 [70].

Para mitigar estos efectos, se han desarrollado estrategias avanzadas, como el uso de múltiples longitudes de onda, algoritmos de inversión mas sofisticados e integración de datos satelitales con mediciones en tierra y modelos químicos atmosféricos. Sin embargo, estas interferencias pueden ocasionar sobreestimaciones o subestimaciones de las abundancias de NO_2 en determinadas regiones, especialmente aquellas con altas tasas de deforestación, donde la reducción de vegetación podría alterar las emisiones de COVB y por tanto, las señales atribuidas al NO_2 . Se requieren mas estudios para determinar el origen del NO_2 y el motivo de su permanencia a lo largo de todo el año en esta región.

Figura 11

Distribución espacial de las abundancias de NO₂ sobre el territorio guatemalteco en época seca y lluviosa.



Nota: a. Distribución espacial de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, durante la época lluviosa, para 2005; b. distribución espacial de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, durante la época seca, para 2005; c. distribución espacial de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, durante la época

lluviosa, para 2013; d. distribución espacial de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, durante la época seca, para 2013; e. distribución espacial de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, durante la época lluviosa, para 2021; b. distribución espacial de NO₂ sobre el territorio guatemalteco, durante la época seca, para 2021. Fuente: elaboración propia con Giovanni [58,67].

Otra variable a considerar para evaluar la presencia significativa de dióxido de nitrógeno en esta zona es la geografía del lugar, pues el área mencionada se encuentra cercana a importantes cadenas montañosas que atraviesan el país, pudiendo generar zonas de acumulación del gas, el cual sería generado entonces en otra región y arrastrado hasta la reserva de Chilascó.

Se requieren mas estudios para determinar los motivos del incremento en las lecturas de abundancias de NO₂ en esta zona.

El resto del país no presenta mas puntos de acumulación significativa de NO₂, observándose una abundancia menor del gas a lo largo de todo el año, independientemente de si es época lluviosa o seca (figura 7). Esto es consistente con el tipo de actividad antropogénica, el tipo de urbanización y la actividad industrial que se desarrollan en el resto del país, donde los suelos se utilizan principalmente para cultivos vegetales, cultivos de café, cardamomo, macadamia y ganadería, se encuentran sin uso específico o son conservados en forma de parques nacionales y biotopos protegidos (como sucede en la sub región norte, el departamento de Petén) [68]. La urbanización en estas áreas, a excepción de la ciudad capital y sus alrededores, (donde el crecimiento urbano es constante y se centra la mayor parte de industria y transporte del país) se encuentra en lenta expansión, pues es mas bien de tipo rural [54,65].

La figura 11 muestra como es la distribución del NO₂ sobre el territorio guatemalteco durante la época seca y la época lluviosa, para los años 2005, 2013 y 2020 (como ejemplos de comportamiento típico).

Al analizar las distribuciones espaciales del NO₂ durante la época seca y la época lluviosa, se observa que los puntos de emisión/acumulación, son los mismos durante todo el año (la costa del Pacífico y la reserva comunitaria de Chilascó), independientemente de la época. En estos puntos existe mayor abundancia de NO₂ durante la época seca, coincidiendo con lo antes mencionado (los períodos de mayor funcionamiento de las industrias de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles y azucarera).

Al analizar toda la información obtenida puede establecerse que, dentro del territorio guatemalteco, hasta el momento la abundancia de NO₂ se encuentra principalmente influenciada por la variación climática estacional de la región. A pesar de que, de forma local, en la región de la costa del Pacífico, el NO₂ se incrementa de forma importante para el país, debido a la actividad industrial de la zona.

Es importante notar que la quema estacional de biomasa que tiene lugar de forma regular, hacia fines de la época seca del país, aunque es intensa y extendida por toda la región Norte, no tiene impacto significativo en los promedios anuales de abundancia de NO₂ sobre el territorio o incluso sobre la sub región, así como tampoco tiene impacto significativo en la distribución general del gas.

La importancia de este tipo de estudios es fundamental, dada la falta de información existente y la falta de recursos para llevar a cabo mediciones en superficie. Siendo indispensable contar con información para la toma de decisiones y el eventual desarrollo de políticas de regulación de emisiones por parte de la industria, siendo Guatemala un país en vías de desarrollo y con una creciente industria energética y azucarera que, eventualmente, puede llevar a la elevación significativa de la presencia del NO₂ en la tropósfera de forma que altere la distribución espacial de toda la región.

CONCLUSIONES

1. La abundancia del NO₂ sobre todo el territorio guatemalteco se encuentra principalmente influenciada por la variación climática estacional de la región.
2. Existen dos puntos de generación/acumulación importantes del país: la región de la costa del Pacífico y la Reserva de Chilascó. El resto del país presenta poca variación en la distribución de NO₂.
3. La elevada abundancia de NO₂ en la región de la costa sur es debida a la actividad industrial que se concentra en dicha zona. Esta presencia elevada del gas no tiene influencia significativa en la distribución general de toda la región.
4. La distribución de NO₂ de la región de la costa del Pacífico tiene un comportamiento estacional, incrementándose su abundancia durante la temporada seca y disminuyendo en la época lluviosa. Esta variación está relacionada con la temporada de alta producción en las industrias (temporada seca) con fuertes emisiones de NO₂ de la zona.
5. No existe evidencia que indique que el NO₂ encontrado sobre la región de la Reserva de Chilascó es generado en ese punto o de origen antropogénico. Es posible que esta elevación de abundancia del NO₂ sea debido a interferencias en la medición del gas, provocadas por la existencia de COVB's. Por tanto, se requieren mas estudios para establecer la fuente.

6. La tendencia general en la abundancia anual de NO₂ sobre todo el territorio guatemalteco es a la reducción.

7. Los incendios forestales que tienen lugar en grandes cantidades durante el final de la temporada seca en la región norte del país, no tienen efecto significativo en la distribución anual o estacional del NO₂.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere llevar a cabo estudios mas profundos sobre el territorio de la Reserva de Chilascó, a ser posible llevando a cabo mediciones en tierra, para determinar el origen de la abundancia de NO₂ en dicha zona.
2. Se sugiere llevar a cabo un estudio sobre la periodicidad de los datos en tiempos superiores al año, para determinar como influyen en la abundancia de NO₂ fenómenos climáticos como El Niño y La Niña, que tienen efecto sobre el territorio guatemalteco con periodicidades superiores a un año.
3. Se sugiere elaborar un estudio para determinar las emisiones de NO₂ provenientes de los numerosos incendios forestales que tienen lugar en a región de Petén para establecer el comportamiento específico (se sugiere un análisis mensual en lugar de anual) y el mecanismo de eliminación del gas en esa zona.
4. Se sugiere llevar a cabo mediciones en tierra, de las abundancias de NO₂, en puntos estratégicos de las principales ciudades del país, para determinar si existen emisiones significativas del NO₂ y cuál es el comportamiento general del gas en estas áreas.

REFERENCIAS

- [1] H. O. Benavides Ballesteros, Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático, (2007).
- [2] J. Lelieveld, S. Beirle, C. Hörmann, G. Stenchikov, and T. Wagner, Abrupt recent trend changes in atmospheric nitrogen dioxide over the Middle East, *Science Advances* **1**, e1500498 (2015).
- [3] E. Suddick and E. Davidson, The Role of Nitrogen in Climate Change and Impactos of Nitrogen-Climate Interactions on Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Agriculture and Human Health in the United States, North American Nitrogen Center of the International Nitrogen Initiative (NANC-INI), Woods Hole Research Center, 2012.
- [4] IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.
- [5] A. S. Lefohn et al., Tropospheric ozone assessment report: Global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research, *Elementa: Science of the Anthropocene* **6**, 27 (2018).
- [6] S. Sillman, The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmospheric Environment* **33**, 1821 (1999).
- [7] D. Galán Madruga and R. Fernández Patier, Implicación de los NO_x en la química atmosférica, *Revista Electrónica de Medioambiente UCM* (2006).
- [8] J. L. Peel, R. Haeuber, V. Garcia, A. G. Russell, and L. Neas, Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health, *Biogeochemistry* **114**, 121 (2013).
- [9] A. J. Cohen et al., Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, *The Lancet* **389**, 1907 (2017).

- [10] Y. O. Khaniabadi, G. Goudarzi, S. M. Daryanoosh, A. Borgini, A. Tittarelli, and A. De Marco, Exposure to PM₁₀, NO₂, and O₃ and impacts on human health, *Environ Sci Pollut Res* **24**, 2781 (2017).
- [11] N. Krotkov et al., Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015, (2015).
- [12] K. F. Boersma et al., An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for the Ozone Monitoring Instrument, (2011).
- [13] L. M. David and P. R. Nair, Tropospheric column O₃ and NO₂ over the Indian region observed by Ozone Monitoring Instrument (OMI): Seasonal changes and long-term trends, *Atmospheric Environment* **65**, 25 (2013).
- [14] Z. ul-Haq, S. Tariq, and M. Ali, Tropospheric NO₂ Trends over South Asia during the Last Decade (2004–2014) Using OMI Data, *Advances in Meteorology* **2015**, 1 (2015).
- [15] R. J. van der A, D. H. M. U. Peters, H. Eskes, K. F. Boersma, M. Van Roozendaal, I. De Smedt, and H. M. Kelder, Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China, *J. Geophys. Res.* **111**, D12317 (2006).
- [16] Z. Lu, D. G. Streets, B. de Foy, L. N. Lamsal, B. N. Duncan, and J. Xing, Emissions of nitrogen oxides from US urban areas: estimation from Ozone Monitoring Instrument retrievals for 2005–2014, *Atmos. Chem. Phys.* **15**, 10367 (2015).
- [17] J. Green and S. Sánchez, *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*, (2013).
- [18] INSIVUMEH, *Legislación*,
<http://hidromet.insivumeh.gob.gt/calidadaire/regulaciones.htm>.
- [19] INSIVUMEH, *Calidad del aire*,
<http://hidromet.insivumeh.gob.gt/calidadaire/documentos.htm>.
- [20] P. Oliva, Calidad del aire en Ciudad de Guatemala, *Revista Científica, Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas* **14**, (n.d.).

- [21] P. Oliva and E. Taracena, Informe Anual de La Calidad Del Aire Ciudad de Guatemala 2018, Laboratorio de Monitoreo de la Calidad del Aire, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019.
- [22] NASA, *Advanced Webinar: High Resolution NO2 Monitoring From Space with TROPOMI.*, <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/webinars/19-NO2/session2-Span-final.pdf>.
- [23] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation*, Seventh edition (Wiley, Hoboken, NJ, 2015).
- [24] J. R. Jensen, *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, 2nd ed (Pearson Education, Delhi, India, 2008).
- [25] J. B. Campbell, *Introduction to Remote Sensing*, Fifth edition (Guilford Press, New York, 2011).
- [26] P. F. Levelt et al., The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space, *Atmos. Chem. Phys.* **18**, 5699 (2018).
- [27] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press., 2021.
- [28] WMO, *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. Global Ozone Research and Monitoring Project - , No. Report No. 58*, World Meteorological Organization, 2018.
- [29] G. L. Stephens, D. O'Brien, P. J. Webster, P. Pilewski, S. Kato, and J. Li, The albedo of Earth, *Reviews of Geophysics* **53**, 141 (2015).
- [30] D. Spitzer, G. O'Byrne, N. Urquizo, and B. Bojkov, Using satellite data to monitor the quality of urban air, (2010).
- [31] L. Zhang, D. J. Jacob, X. Liu, J. A. Logan, K. Chance, A. Eldering, and B. R. Bojkov, Intercomparison methods for satellite measurements of atmospheric composition: application to tropospheric ozone from TES and OMI, *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 4725 (2010).

- [32] K.-P. Heue, M. Coldewey-Egbers, A. Delcloo, C. Lerot, D. Loyola, P. Valks, and M. Van Roozendaal, Trends of tropical tropospheric ozone from 20 years of European satellite measurements and perspectives for the Sentinel-5 Precursor, *Atmos. Meas. Tech.* **9**, 5037 (2016).
- [33] ESA, *The Development of a New Instrument.*, <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet83/gome83.htm>.
- [34] NASA, Aqua, *Aqua Earth-Observing Satellite Mission*, <https://aqua.nasa.gov>.
- [35] NASA, Terra, *About Terra*, <https://terra.nasa.gov/about>.
- [36] NASA, SUOMI, *SUOMI NPP Suomi National Polar-Orbiting Partnership*, <https://science.nasa.gov/mission/suomi-npp/>.
- [37] NASA, GOES R, *GOES R*, <https://www.goes-r.gov>.
- [38] E. S. A. ESA, *Sentinel-5P*, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/copernicus/sentinel-5p>.
- [39] P. Levelt, G. H. J. Oord, M. Dobber, A. Mälkki, H. Visser, J. D. Vries, P. Stammes, J. O. V. Lundell, and H. Saari, The ozone monitoring instrument, (2006).
- [40] A. Heckel, S.-W. Kim, G. J. Frost, A. Richter, M. Trainer, and J. P. Burrows, Influence of low spatial resolution a priori data on tropospheric NO₂ satellite retrievals, *Atmos. Meas. Tech.* **4**, 1805 (2011).
- [41] J. Fishman et al., Remote Sensing of Tropospheric Pollution from Space, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **89**, 805 (2008).
- [42] K. F. Boersma, D. J. Jacob, M. Trainic, Y. Rudich, I. DeSmedt, R. Dirksen, and H. J. Eskes, Validation of urban NO₂ concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from the SCIAMACHY and OMI sensors using in situ surface measurements in Israeli cities, *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 3867 (2009).

- [43] L. N. Lamsal et al., Ozone Monitoring Instrument (OMI) Aura nitrogen dioxide standard product version 4.0 with improved surface and cloud treatments, *Atmos. Meas. Tech.* **14**, 455 (2021).
- [44] R. V. Martin, Satellite remote sensing of surface air quality, *Atmospheric Environment* **42**, 7823 (2008).
- [45] C. Kidd, P. Bauer, J. Turk, G. J. Huffman, R. Joyce, K.-L. Hsu, and D. Braithwaite, Intercomparison of High-Resolution Precipitation Products over Northwest Europe, *Journal of Hydrometeorology* **13**, 67 (2012).
- [46] U. Platt and J. Stutz, *Differential Optical Absorption Spectroscopy* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008).
- [47] W. Gao, J. R. Slusser, and D. L. Schmoltdt, editors, *UV Radiation in Global Climate Change: Measurements, Modeling and Effects on Ecosystems* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010).
- [48] A. Russell, L. Valin, and R. C. Cohen, Trends in OMI NO₂ observations over the United States: effects of emission control technology and the economic recession, (2012).
- [49] F. Liu, Q. Zhang, R. J. van der A, B. Zheng, D. Tong, L. Yan, Y. Zheng, and K. He, Recent reduction in NO_x emissions over China: synthesis of satellite observations and emission inventories, *Environ. Res. Lett.* **11**, 114002 (2016).
- [50] Equipo editorial, Etecé, *GUATEMALA -Información y Características-*, <https://www.caracteristicas.co/guatemala/>.
- [51] Ministerio de Asuntos Exteriores and Unión Europea, *GUATEMALA República de Guatemala*, https://www.exteriores.gob.es/Documents/FichasPais/GUATEMALA_FICHA%20PAIS.pdf.
- [52] E. J. Castellanos, A. Paiz-Estevez, E. Bámaca, M. Rosales-Alconero, and A. Santizo, Primer Reporte de Evaluación Del Conocimiento Sobre Cambio Climático En Guatemala: Resumen Para Tomadores de Decisión, No. 1, Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático (SGCCC), 2019.

- [53] G. Alfaro and R. Gómez, *Antecedentes y Contexto Del Cambio Climático En Guatemala*, No. capítulo 1, Editorial Universitaria UVG, 2019.
- [54] Incyt, *Perfil energético de Guatemala: bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*, Universidad Rafael Landívar, 2018.
- [55] S. de I. F. de G. SIFGUA, *Sistema de Información General de Guatemala*, <https://www.sifgua.org.gt/SIFGUADData/Home.aspx>.
- [56] USAC and MARN, *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala año 2013*, Universidad de San Carlos de Guatemala y Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2013.
- [57] K. Aguilar, R. Contreras, and A. Zapeta, *Primeros elementos para comprender el potencial hidroeléctrico de Guatemala*, **249**, (2023).
- [58] K. Aguilar, R. Contreras, J. A. García, and C. I. Rivera, *NO₂ distribución espacial y tendencias sobre el territorio guatemalteco, entre 2005 y 2021, empleando datos de OMI*, *Rev. Escuela Física* **11**, 52 (2023).
- [59] *Google Earth*, https://earth.google.com/web/search/Guatemala/@15.88458089,-89.95477676,343.28039165a,848226.47852764d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCZ9sj69IUDNAEc5wO32CTilAGW1DOxQ-zFTAlc_u-ZfdC1jA.
- [60] K. Aguilar, R. Contreras, and A. Zapeta, *La realidad actual del potencial hídrico de Guatemala*, *Análisis de La Realidad Nacional* (2023).
- [61] Cengicaña, *Informe Anual 2020-2021*, 2022.
- [62] S. I. de B. SIB, *Sector Azucarero: Análisis de Sectores Económicos*, (2011).
- [63] G. E. S. NASA, *NO₂ Tropospheric Column (30% Cloud Sreened) OMNO2d V003*, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.
- [64] MathWorks, *MATLAB*, (2022).

- [65] C. N. de E. E. CNEE, Gerencia de Planificación y Vigilancia de Mercados Eléctricos 2015-2019, Informe Estadístico, 2020.
- [66] I. N. de B. INAB, Anuario de Estadísticas Forestales de Guatemala 2019, (2019).
- [67] NASA, *Fire Information for Resource Management System -FIRMS-*, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>.
- [68] J. A. Fajardo, *Centro Ecoturístico Las Pozas de Chilascó*, <https://aprende.guatemala.com/historia/geografia/salto-de-chilasco-baja-verapaz/>.
- [69] S. de I. C. SIC, *Sistema de Información Cultural: Salto de Chilascó*, https://www.sicultura.gob.gt/directory-directorio_c/listing/salto-de-chilasco/.
- [70] A. Guenther et al., A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.* **100**, 8873 (1995).