



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Planeación Urbana y Regional
Licenciatura en Ciencias Ambientales



**Análisis de la contaminación atmosférica en la
República Mexicana mediante imágenes satelitales
EO BROWSER (2019 – 2021).**

TESIS

Que para obtener el título de:

Licenciado en Ciencias Ambientales

Presenta:

RODOLFO RAZIEL GUADARRAMA GASCA

Directora De Tesis:

Dra. en A. Ana Marcela Gómez Hinojos

Asesora Externa:

Dra. en C. De La T. Xochitl Cruz Núñez

Toluca, México, agosto 2023

ÍNDICE

Resumen	- 10 -
Abstract	- 10 -
Introducción	- 11 -
Esquema de la investigación	- 15 -
a) Justificación	- 15 -
b) Planteamiento del problema	- 15 -
c) Objetivo General	- 16 -
d) Objetivos Particulares	- 16 -
e) Hipótesis	- 16 -
f) Metodología	- 17 -
f.1 Alcance de la investigación	- 18 -
f.2 Diseño de la investigación	- 18 -
f.3 Población de estudio	- 18 -
f.4 Instrumento de medición	- 18 -
f.5 Recolección de datos	- 19 -
1.- Antecedentes	- 20 -
1.1 Ámbito internacional	- 21 -
1.2 Ámbito nacional	- 25 -
2.- Marco Conceptual	- 27 -
2.1 Atmósfera	- 28 -
2.1.1 Circulación general de la atmósfera	- 28 -
2.1.2 Funcionamiento de los vientos	- 29 -
2.1.3 Células atmosféricas	- 29 -
2.1.4 Efecto Coriolis	- 30 -
2.1.5 Clima	- 30 -
2.1.5.1 Temperatura	- 30 -
2.1.5.2 Humedad relativa	- 31 -
2.1.5.3 Viento	- 31 -
2.1.5.4 Presión atmosférica	- 31 -
2.1.5.5 Precipitación	- 31 -
2.1.5.6 Nubosidad	- 31 -
2.2 Contaminación	- 32 -

2.2.1 Contaminación ambiental -----	32 -
2.2.2 Contaminación atmosférica-----	32 -
2.2.3 Origen de los contaminantes -----	32 -
2.2.4 Contaminantes criterio-----	32 -
2.2.4.1 Ozono (O ₃) -----	33 -
2.2.4.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	33 -
2.2.4.3 Monóxido de carbono (CO)-----	33 -
2.2.4.4 Dióxido de azufre (SO ₂)-----	34 -
2.2.4.5 Material particulado PM10-----	34 -
2.2.4.6 Material particulado PM2.5 -----	35 -
2.2.5 Fuentes de emisión de los contaminantes criterio-----	35 -
2.2.6 Gases de efecto invernadero -----	35 -
2.2.6.1 Potencial de calentamiento global -----	36 -
2.2.7 Aerosoles -----	36 -
2.2.7.1 Propiedades generales -----	36 -
Existen diversas propiedades físicas-radiativas asociadas a los aerosoles:-----	36 -
2.2.7.2 Forzamiento radiativo -----	37 -
2.2.7.3 Balance energético -----	37 -
2.2.7.4 Albedo -----	37 -
2.2.7.5 Radiación-----	38 -
2.2.8 Contaminación atmosférica en las principales zonas metropolitanas del país-----	39 -
2.2.9 Emisión de contaminantes por actividad en la República Mexicana-----	40 -
2.3 Percepción remota en Sistemas de Información Geográfica -----	41 -
2.3.1 Sistemas de Información Geográfica -----	41 -
2.3.2 Softwares especializados -----	41 -
2.3.2.1 QGIS-----	41 -
2.3.2.2 ArcGIS-----	42 -
2.3.2.3 SNAP -----	42 -
2.3.3 Satélites -----	42 -
2.3.3.1 Sentinel-5P -----	42 -
2.3.3.2 Landsat 8-----	43 -
2.3.3.3 SPOT-----	43 -
2.3.3.4 EOS -----	44 -

2.4 EO BROWSER -----	- 44 -
2.4.1 Características generales -----	- 44 -
2.4.1 Sensor TROPOMI-----	- 45 -
2.4.2 Contaminantes atmosféricos registrados por el sensor TROPOMI -----	- 45 -
2.4.2.1 Monóxido de carbono (CO)-----	- 45 -
2.4.2.2 Formaldehído (HCHO) -----	- 45 -
2.4.2.3 Metano (CH ₄) -----	- 45 -
2.4.2.4 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	- 46 -
2.4.2.5 Dióxido de azufre (SO ₂)-----	- 46 -
2.4.2.6 Ozono (O ₃)-----	- 46 -
2.4.2.7 Índice de aerosoles -----	- 47 -
3.- Marco Contextual -----	- 48 -
3.1 Características fisiográficas de México-----	- 49 -
3.1.1 Localización -----	- 49 -
3.1.2 División política -----	- 51 -
3.1.3 Geomorfología y relieve -----	- 52 -
3.1.4 Clima-----	- 53 -
3.1.4.1 Temperatura -----	- 53 -
3.1.4.2 Humedad relativa-----	- 53 -
3.1.4.3 Viento-----	- 54 -
3.1.4.4 Presión atmosférica -----	- 55 -
3.1.4.5 Precipitación -----	- 55 -
3.1.4.2 Nubosidad -----	- 55 -
3.2 Características socioeconómicas de México-----	- 56 -
3.2.1 Dinámica Poblacional-----	- 56 -
3.2.2 Actividades económicas en México-----	- 58 -
4.- Marco Normativo -----	- 59 -
4.1 Normatividad Internacional -----	- 60 -
4.1.1 Guías de calidad del aire de la OMS-----	- 60 -
4.1.2 Agencia de Protección Ambiental (EPA) -----	- 61 -
4.2 Normatividad nacional-----	- 63 -
4.2.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)-----	- 63 -
4.2.2 NOM-020-SSA1-2020(DOF, 2020) -----	- 63 -

4.2.3 NOM-022-SSA1-2019 (DOF, 2019) -----	- 63 -
4.2.4 NOM-023-SSA1-2021(DOF, 2021) -----	- 64 -
4.2.5 NOM-021-SSA1-2021(DOF, 2021) -----	- 64 -
4.2.6 IMECA -----	- 64 -
4.2.6 Índice AIRE Y SALUD -----	- 65 -
5.- Resultados y Observaciones -----	- 66 -
5.1 Primavera 2019-----	- 68 -
5.1.1 Monóxido de carbono (CO): -----	- 68 -
5.1.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂): -----	- 68 -
5.1.3 Dióxido de azufre (SO ₂): -----	- 68 -
5.2 Primavera 2020-----	- 76 -
5.2.1 Monóxido de carbono (CO): -----	- 76 -
5.2.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂): -----	- 76 -
5.2.3 Dióxido de azufre (SO ₂): -----	- 76 -
5.3 Verano 2019-----	- 84 -
5.3.1 Monóxido de carbono (CO) -----	- 84 -
5.3.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	- 84 -
5.3.3 Dióxido de azufre (SO ₂) -----	- 84 -
5.4 Verano 2020-----	- 92 -
5.4.1 Monóxido de carbono (CO) -----	- 92 -
5.4.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	- 92 -
5.4.3 Dióxido de azufre (SO ₂) -----	- 92 -
5.5 Otoño 2019 -----	- 100 -
5.5.1 Monóxido de carbono (CO) -----	- 100 -
5.5.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	- 100 -
5.5.3 Dióxido de azufre (SO ₂) -----	- 100 -
5.6 Otoño 2020 -----	- 108 -
5.6.1 Monóxido de carbono (CO) -----	- 108 -
5.6.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	- 108 -
5.6.3 Dióxido de azufre (SO ₂) -----	- 108 -
5.7 Invierno 2020 -----	- 116 -
5.7.1 Monóxido de carbono (CO) -----	- 116 -
5.7.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂) -----	- 116 -

5.7.3 Dióxido de azufre (SO ₂)	116
5.8 Invierno 2021	124
5.8.1 Monóxido de carbono (CO)	124
5.8.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	124
5.8.3 Dióxido de azufre (SO ₂)	124
6.- Conclusiones	132
Bibliografía	137

Índice de tablas

Capítulo 2. Marco Conceptual

Tabla 2.1 Concentración de contaminantes por zona metropolitana, 2016.....	- 39 -
Tabla 2.2 Emisiones de contaminantes por actividad económica	- 40 -

Capítulo 4. Marco Normativo

Tabla 4.1 Límites máximos permisibles para contaminantes criterio OMS	- 61 -
Tabla 4.2 Límites máximos permisibles para contaminantes criterio EPA.....	- 62 -

Índice de mapas

Capítulo 3. Marco Contextual

Mapa 3.1 Localización y delimitación de la República Mexicana	- 50 -
Mapa 3.2 División Política de la República Mexicana	- 51 -
Mapa 3.3 Geomorfología y relieve de la República Mexicana	- 52 -
Mapa 3.4 Densidad poblacional en la República Mexicana	- 57 -

Capítulo 5. Resultados y observaciones

Mapa 5.1 Concentración de monóxido de carbono (CO), primavera 2019.	- 70 -
Mapa 5.2 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), primavera 2019.	- 71 -
Mapa 5.3 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), primavera 2019.....	- 72 -
Mapa 5.4 Velocidad del viento en m/s, primavera 2019.	- 73 -
Mapa 5.5 Hipsometría de México.....	- 74 -
Mapa 5.6 Distribución de ciudades de México.....	- 75 -
Mapa 5.7 Concentración de monóxido de carbono (CO), primavera 2020.	- 78 -
Mapa 5.8 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), primavera 2020.	- 79 -
Mapa 5.9 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), primavera 2020.	- 80 -
Mapa 5.10 Velocidad del viento en m/s, primavera 2020.	- 81 -
Mapa 5.11 Hipsometría de México.....	- 82 -
Mapa 5.12 Distribución de ciudades de México.....	- 83 -
Mapa 5.13 Concentración de monóxido de carbono (CO), verano 2019.	- 86 -
Mapa 5.14 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), verano 2019.	- 87 -
Mapa 5.15 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), verano 2019.	- 88 -
Mapa 5.16 Velocidad del viento en m/s, verano 2019.	- 89 -
Mapa 5.17 Hipsometría de México.....	- 90 -
Mapa 5.18 Distribución de ciudades de México.....	- 91 -
Mapa 5.19 Concentración de monóxido de carbono (CO), verano 2020.	- 94 -
Mapa 5.20 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), verano 2020.	- 95 -
Mapa 5.21 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), verano 2020.	- 96 -
Mapa 5.22 Velocidad del viento en m/s, verano 2020.	- 97 -

Mapa 5.23 Hipsometría de México.....	- 98 -
Mapa 5.24 Distribución de ciudades de México.....	- 99 -
Mapa 5.25 Concentración de monóxido de carbono (CO), otoño 2019	- 102 -
Mapa 5.26 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), otoño 2019	- 103 -
Mapa 5.27 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), otoño 2019	- 104 -
Mapa 5.28 Velocidad del viento en m/s, otoño 2019	- 105 -
Mapa 5.29 Hipsometría de México.....	- 106 -
Mapa 5.30 Distribución de ciudades de México.....	- 107 -
Mapa 5.31 Concentración de monóxido de carbono (CO), otoño 2020	- 110 -
Mapa 5.32 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), otoño 2020	- 111 -
Mapa 5.33 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), otoño 2020	- 112 -
Mapa 5.34 Velocidad del viento en m/s, otoño 2020	- 113 -
Mapa 5.35 Hipsometría de México.....	- 114 -
Mapa 5.36 Distribución de ciudades de México.....	- 115 -
Mapa 5.37 Concentración de monóxido de carbono (CO), invierno 2020	- 118 -
Mapa 5.38 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), invierno 2020	- 119 -
Mapa 5.39 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), invierno 2020	- 120 -
Mapa 5.40 Velocidad del viento en m/s, invierno 2020	- 121 -
Mapa 5.41 Hipsometría de México.....	- 122 -
Mapa 5.42 Distribución de ciudades de México.....	- 123 -
Mapa 5.43 Concentración de monóxido de carbono (CO), invierno 2021	- 126 -
Mapa 5.44 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂), invierno 2021	- 127 -
Mapa 5.45 Concentración de dióxido de azufre (SO ₂), invierno 2021	- 128 -
Mapa 5.46 Velocidad del viento en m/s, invierno 2021	- 129 -
Mapa 5.47 Hipsometría de México.....	- 130 -
Mapa 5.48 Distribución de ciudades de México.....	- 131 -

Resumen

El presente trabajo de investigación, tuvo como objetivo el análisis de la contaminación atmosférica mediante imágenes satelitales EO BROWSER, en la República Mexicana durante el periodo estacional primavera 2019 a invierno 2021. Se analizaron tres contaminantes distintos: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) en las cuatro temporadas estacionales del año: primavera, verano, otoño e invierno, en horarios de las 16:00 a las 18:00 h.

Del mismo modo, dichas concentraciones fueron relacionadas con una serie de factores que podían influir en su concentración y dispersión como la velocidad del viento, hipsometría y distribución de ciudades.

En los resultados se pudo representar la dispersión de los tres contaminantes analizados en las distintas regiones y estados de la república, encontrando variaciones significativas en monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno. Asimismo, se muestra cierta relación entre los factores previamente mencionados, principalmente en la velocidad del viento, misma que pudo considerarse como factor determinante en la dispersión de partículas en la atmósfera.

Abstract

This research work aimed to analyze atmospheric pollution using EO BROWSER satellite images in Mexico during the seasonal period from spring 2019 to winter 2021. Three different pollutants were analyzed: carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), and sulfur dioxide (SO₂) during the four seasonal periods of the year: spring, summer, fall, and winter, between the hours of 16:00 and 18:00.

Similarly, these concentrations were correlated with a series of factors that could influence their concentration and dispersion, such as wind speed, hypsometry, and city distribution.

The results showed the dispersion of the three pollutants analyzed across different regions and states of the country, finding significant variations in carbon monoxide and nitrogen dioxide. Furthermore, there appears to be a relationship between the previously mentioned factors, especially wind speed, which could be considered a determining factor in particle dispersion in the atmosphere.

Introducción

La contaminación atmosférica se ha convertido en uno de los principales problemas medioambientales a nivel global, con consecuencias que van más allá de la degradación del aire que respiramos. Esta contaminación es el resultado de la liberación al ambiente de sustancias nocivas, ya sean partículas, gases o compuestos químicos, que alteran de manera significativa la composición natural de la atmósfera. Si bien algunos de estos contaminantes tienen origen natural, como las erupciones volcánicas o los incendios forestales, la mayoría son fruto de actividades humanas. La industrialización, la quema masiva de combustibles fósiles para obtener energía y el uso extensivo de vehículos a motor han sido factores determinantes en el aumento de la contaminación del aire en las últimas décadas. Estos contaminantes no solo afectan la salud humana, causando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, sino que también tienen un impacto directo en el medio ambiente. Efectos como la lluvia ácida, la formación de smog o la degradación de la capa de ozono son manifestaciones directas de este problema. Además, algunos contaminantes, como los gases de efecto invernadero, contribuyen al cambio climático, lo que plantea retos aún mayores para el futuro de nuestro planeta (EPA, 2020).

Las ciudades desempeñan un papel crucial en la contaminación atmosférica debido a su alta densidad de población, la concentración de actividades industriales y la gran cantidad de vehículos. Las emisiones vehiculares, las plantas industriales, la quema de combustibles fósiles en hogares y edificios, y otras fuentes urbanas liberan una amplia gama de contaminantes en el aire. Además, la infraestructura y el diseño de las ciudades pueden exacerbar los niveles de contaminación; por ejemplo, los cañones urbanos (calles flanqueadas por edificios altos) pueden atrapar la contaminación cerca del suelo. La topografía y las condiciones meteorológicas también pueden influir en cómo se dispersan o se acumulan los contaminantes en áreas urbanas. Como resultado, muchas metrópolis enfrentan problemas de calidad del aire, como el smog, que tiene efectos perjudiciales para la salud humana, el medio ambiente y la economía. Es esencial que las ciudades adopten estrategias de gestión y planificación para mitigar la contaminación atmosférica y proteger a sus habitantes (OMS, 2022).

Las imágenes satelitales desempeñan un papel fundamental en el análisis de contaminantes, al ofrecer una perspectiva global y detallada de la composición y distribución de estos agentes disueltos en la atmósfera. Estas son algunas formas en las que ayudan:

- Los satélites equipados con sensores especializados pueden detectar y cuantificar diversos gases y partículas en la atmósfera, como dióxido de nitrógeno, ozono, metano, dióxido de azufre y aerosoles.

- Proporcionan actualizaciones regulares, lo que permite monitorear eventos de contaminación en tiempo real, como brotes de smog, erupciones volcánicas o incendios forestales.
- Las imágenes satelitales ofrecen una cobertura global, permitiendo estudiar zonas remotas o inaccesibles donde las estaciones de monitoreo terrestre podrían no estar presentes.
- Al tener series temporales de imágenes, se pueden estudiar las tendencias y variaciones estacionales o anuales de los contaminantes, esencial para investigaciones climáticas y ambientales.
- A través del análisis de las imágenes, es posible identificar y localizar fuentes específicas de emisión, como zonas industriales, áreas urbanas o grandes incendios.
- Las mediciones satelitales pueden ser usadas para validar o complementar datos obtenidos de estaciones de monitoreo terrestre, asegurando así una mayor precisión en los análisis.
- Las imágenes y datos satelitales son fundamentales para alimentar y validar modelos atmosféricos que predicen la dispersión de contaminantes y otros fenómenos relacionados. (EPA, 2020)

La situación de contaminación atmosférica en México ha sido motivo de preocupación en varias regiones del país, en particular en las áreas metropolitanas más grandes como el Valle de México (que incluye a la Ciudad de México), Guadalajara, Monterrey, entre otras.

A pesar de las diversas iniciativas y programas implementados en México para mejorar la calidad del aire, el país enfrenta varios desafíos significativos en este ámbito. Uno de los principales obstáculos es la continua expansión urbana en las principales metrópolis. La rápida urbanización, caracterizada por el aumento de construcciones, carreteras y otras infraestructuras, ha conducido a un incremento en las emisiones de contaminantes provenientes de la construcción, el tráfico vehicular y la industria.

El crecimiento del parque vehicular es otro factor crucial. Con más vehículos en las carreteras, especialmente aquellos que son más antiguos y menos eficientes en términos de emisiones, la cantidad de contaminantes liberados al aire aumenta considerablemente. Aunque se han realizado esfuerzos para modernizar el transporte público y promover medios de transporte más limpios, como el uso de la bicicleta o vehículos eléctricos, la transición ha sido lenta.

Además, la topografía y condiciones geográficas de algunas ciudades, como la Ciudad de México, complica aún más la situación. Al estar rodeada de montañas, esta ciudad tiende a "atrapar" los contaminantes en la cuenca, limitando su dispersión y dilución.

También existe una necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire. La adquisición de datos precisos y oportunos es esencial para evaluar la efectividad de las políticas y programas implementados y para adaptar las estrategias según las necesidades poblacionales.

Finalmente, la sensibilización y educación pública sobre la importancia de la calidad del aire es fundamental. Solo mediante una ciudadanía informada y comprometida se podrá impulsar un cambio real y sostenible en términos de prácticas y comportamientos relacionados con la contaminación atmosférica.

En este sentido, el presente trabajo de investigación, tiene como objetivo analizar la variabilidad de las concentraciones de contaminantes atmosféricos a partir de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma EO BROWSER, en la República Mexicana, durante el periodo estacional primavera 2019 - invierno 2021.

Para el cumplimiento del objetivo, se exponen cinco capítulos; el primero de ellos, relativo a la recopilación de antecedentes que muestren similitud con el tema central de la investigación, y dividido en los contextos internacional y nacional.

En el segundo capítulo, se desarrolla el marco teórico, donde se definieron los principales términos para guiar la investigación, de esta forma se lograron integrar conocimientos relacionados con variables atmosféricas y meteorológicas, contaminación, información satelital, etc. Resulta importante destacar la importancia de este apartado, ya que aporta cierto grado de consistencia al presente trabajo, facilitando la interpretación de los resultados y ofreciendo una perspectiva teórica general de la investigación.

El capítulo tres, va encaminado a un marco contextual, donde se presenta información orientada a la definición de la zona específica de estudio que, para este caso, se trata de la República Mexicana, misma donde se abordaron características como: localización y delimitación, división política, relieve, dinámica poblacional y actividades económicas. La importancia de este capítulo, radica en comprender las circunstancias, condiciones y factores que rodean o pueden influir en el tema de investigación, facilitando una mejor comparación con estudios realizados en contextos similares y, además, ayudando a una mejor comprensión de los resultados obtenidos.

En el marco normativo, correspondiente al capítulo cuarto, se desglosan los principales instrumentos legislativos en materia de contaminación atmosférica, dicha normatividad se encuentra dividida en contextos internacional y nacional, tomando como referencia principal, las Guías de Calidad de Aire de la OMS (para el caso internacional) y las Normas Oficiales Mexicanas (para el caso nacional). De esta forma, se estableció una base legal funcional para el trabajo de investigación; esto permite un análisis más a fondo de la situación actual en México, en materia de normatividad ambiental.

En el capítulo cinco, se muestran los resultados y observaciones obtenidos de la obtención y procesamiento de imágenes satelitales para el análisis de contaminantes criterio en la República Mexicana. La temporalidad designada para mostrar los resultados es por periodo estacional del año (primavera, verano otoño e invierno) para los años 2019, 2020 y 2021. Del mismo modo, la cartografía temática de contaminantes criterio va acompañada de una serie de mapas correspondientes a: velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades, esto con el fin de comparar dichos factores y analizar la forma en que estos influyen en el comportamiento de las partículas disueltas en la atmósfera.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones que fueron construidas a partir de lo analizado en la presente investigación.

Esquema de la investigación

a) Justificación

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales de mayor importancia a nivel mundial, debido a la presión que ejerce sobre la salud humana y por los diversos efectos negativos que genera en los sistemas naturales. Es un problema que deriva principalmente de las actividades antropogénicas; aunque existen ciertos fenómenos naturales que contribuyen (en menor proporción) a la acumulación de contaminantes en el ambiente. El crecimiento económico y la urbanización, junto con el desarrollo de diversas actividades como la industria petrolera, los servicios, la agroindustria y el aumento de unidades automotrices, conducen al consumo intensivo de combustibles fósiles; del mismo modo, las prácticas agrícolas inadecuadas generan grandes cantidades de contaminantes que, combinados con las condiciones ambientales, pueden afectar significativamente a la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales (Romero Placeres, Diego Olite , & Álvarez Toste, 2006). La selección del tema de estudio está directamente relacionada con la situación actual en materia de contaminación atmosférica en la República Mexicana.

De esta forma, resulta preciso conocer la relación existente entre las imágenes satelitales capturadas por EO BROWSER, a bordo del satélite Sentinel 5p, en temporalidades distintas.

b) Planteamiento del problema

La distribución de contaminantes criterio en la República Mexicana representa un riesgo a la salud y calidad de vida de la población, esto debido a los efectos adversos producidos en el sistema respiratorio de los individuos; los altos niveles de contaminación ambiental pueden afectar de forma negativa la función pulmonar, causando exacerbaciones de asma, además de aumentar el riesgo de padecer cáncer de pulmón.

En la República Mexicana existen 74 zonas metropolitanas que contemplan un aproximado del 79% de las emisiones totales de contaminantes criterio hacia la atmósfera, dichas emisiones se encuentran segmentadas por las diversas actividades económicas y de producción en el país.

El estudio de la concentración y distribución de contaminantes criterio mediante el empleo de imágenes satelitales ofrecerá un panorama más amplio sobre el comportamiento espacio-temporal de dichos contaminantes, permitiendo desarrollar escenarios con enfoque hacia la salud de la población, esto, a su vez, permitirá

crear estrategias de prevención para las diversas enfermedades que puedan afectar a los individuos.

c) Objetivo General

Analizar la variabilidad de las concentraciones de contaminantes atmosféricos a partir de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma EO BROWSER, en la República Mexicana, durante el periodo estacional primavera 2019 - invierno 2021.

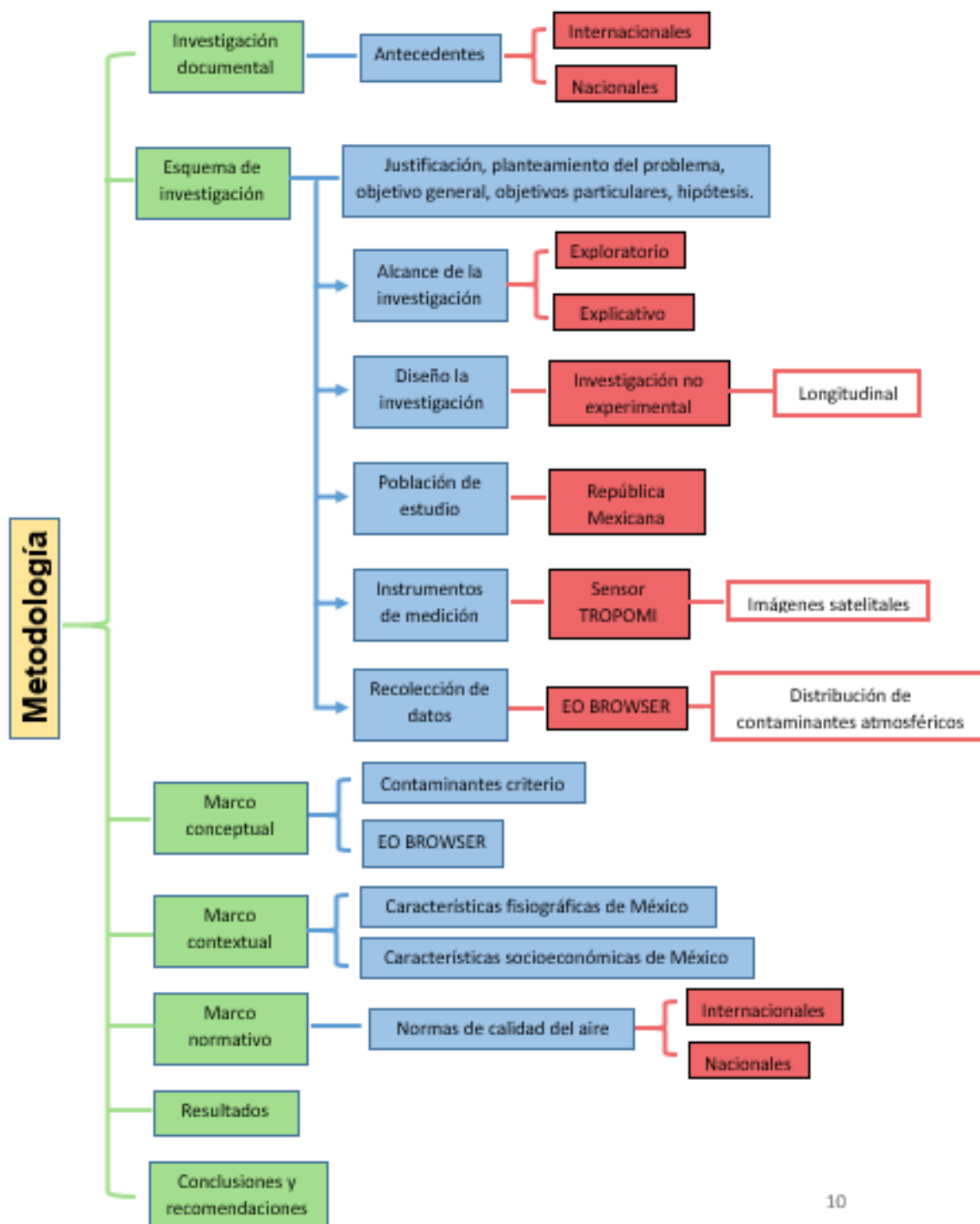
d) Objetivos Particulares

- Definir y geolocalizar la zona de estudio.
- Seleccionar los contaminantes que servirán como elemento de estudio del presente trabajo.
- Establecer la temporalidad y las fechas correspondientes para la comparación de cada contaminante.
- Visualizar los contaminantes atmosféricos mediante la plataforma EO BROWSER en la República Mexicana.
- Procesar las imágenes satelitales para cada contaminante, mediante sistemas de información geográfica (QGIS).
- Comparar las concentraciones de los contaminantes atmosféricos visualizadas en las imágenes satelitales, de acuerdo a la temporalidad y los factores meteorológicos y fisiográficos del área de estudio.

e) Hipótesis

Las concentraciones de contaminantes atmosféricos tendrán variaciones de acuerdo a la temporalidad, factores atmosféricos y características fisiográficas de México.

f) Metodología



f.1 Alcance de la investigación

El estudio en cuestión, toma como referencia la metodología propuesta por Sampieri (2014) para designar los tipos de investigación. De acuerdo con dicha metodología, se puede inferir que esta investigación presenta el siguiente alcance:

- **Exploratorio:** El estudio se encuentra limitado a la poca disponibilidad de información relacionada, convirtiéndolo en un tema poco explorado en el país. Del mismo modo, ofrece la posibilidad de fungir como referente en estudios posteriores.

El alcance de la investigación permitirá la visualización de los contaminantes atmosféricos en la República Mexicana y el comportamiento que estos tuvieron durante el periodo 2019-2021.

f.2 Diseño de la investigación

El presente estudio fue definido como una investigación cuantitativa del tipo no experimental, esto debido a que las variables consideradas no fueron objeto de modificación, si no que fueron trabajadas tal y como se extrajeron de las plataformas correspondientes. Del mismo modo, el estudio aborda una situación ya existente, misma que no puede ser objeto de manipulación, observando los fenómenos dentro de su ambiente y realizando el respectivo proceso de selección, análisis e interpretación de los datos espaciales capturados por el satélite Sentinel-5p y los datos relativos a las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

f.3 Población de estudio

La población designada para el presente estudio se encuentra constituida por la República Mexicana.

f.4 Instrumento de medición

Los instrumentos empleados para el desarrollo de la investigación se dividen en dos partes:

- **Sensor TROPOMI:** Es la herramienta directa que se encarga de capturar los datos relativos a las concentraciones de contaminantes en la atmósfera.
- **EO Browser:** Esta plataforma contiene las imágenes satelitales capturadas por el sensor TROPOMI a bordo del satélite Sentinel-5p para la evaluación de los contaminantes atmosféricos considerados (NO_2 y O_3). Se trata básicamente de una herramienta que permite visualizar la dispersión de los contaminantes en un área y tiempo determinados.

f.5 Recolección de datos

La recolección de datos se concretó gracias a las imágenes satelitales capturadas por el sensor TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), a bordo del Sentinel-5P y almacenadas en las bases de datos de la plataforma EO BROWSER, mismas que fueron analizadas con el software QGIS.

1. Antecedentes

1.1 Ámbito internacional

En 2001, Briz Susana realizó un trabajo sobre la teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante la espectrorradiometría. La metodología de trabajo propuesta está basada en el análisis de alta resolución de las bandas de absorción/emisión de los gases en estudio en la región infrarroja 2-20 μ m. Una de las aportaciones más importantes de este trabajo se refiere a la caracterización espectro-radiométrica de estos gases teniendo en cuenta la influencia del fondo infrarrojo específico y particular de cada problema. Los resultados obtenidos han permitido el diseño de nuevos sistemas para la medida de gases específicos en determinados problemas y la mejora de otros sistemas ya existentes. También ha puesto de relieve las posibilidades que la técnica de teledetección FTIR ofrece para la detección de gases contaminantes, gases de combustión, para el estudio de la atmosfera y como herramienta de caracterización IR de problemas de teledetección de gases (Briz Pacheco, 2004).

En 2014, Benavente Noelia realizó un estudio sobre la dinámica del espesor óptico de los aerosoles a partir de imágenes del sensor MODIS, sobre américa del sur entre los años 2000 y 2012. Fueron requeridos, datos relativos al espesor óptico de aerosoles (AOT) obtenidos de 6 estaciones AERONET distribuidas en Brasil, Chile y Bolivia. Para cada estación, se obtuvieron los promedios mensuales de concentración de aerosoles, generando una serie de tiempo AOT mensual, durante catorce años. Las imágenes extraídas del sensor MODIS indican un aumento de la concentración de contaminantes en la selva amazónica; esto debido a la constante presencia de incendios forestales en temporadas secas.

Por su parte, las series de tiempo procedentes de MODIS-Terra, indican un comportamiento muy similar a las series de MODIS-Aqua, alcanzando picos máximos de concentración de aerosoles entre los meses de agosto y noviembre (temporada seca). Este análisis coincide con los datos extraídos de las estaciones AERONET que, de igual forma, señala que los picos máximos de concentración se alcanzan en las temporadas de sequía (Rojas Benavente, 2014).

En 2017, Vidal Andrés y Vidal Andrea analizaron la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una industria papelera ubicada en el Valle del Cauca, Colombia. Para el análisis fueron considerados tres contaminantes: SO₂, NO₂ y PM₁₀. El estudio fue realizado en tres etapas, la primera consistió en la recopilación de datos fisiográficos y variables meteorológicas; la segunda en la creación de un modelo de dispersión de contaminantes mediante el modelo AERMOD View y la tercera en el impacto sobre los asentamientos humanos cercanos. Los resultados revelaron concentraciones de contaminantes que se encontraban por debajo de lo establecido por la normatividad colombiana, lo que garantiza un eficiente control de emisiones por parte de la industria papelera, generando un bajo impacto sobre las comunidades aledañas (Vidal Daza & Pérez Vidal, 2017).

Ese mismo año, en Bocayá Colombia, Ramos Moreno realizó un modelamiento de aerosoles y material particulado provenientes de la zona productora de coque del municipio de Samacá. Para el modelamiento se tuvo en cuenta el modelo de dispersión Gaussiana a través del software AERMOD. Para la evaluación de los contaminantes, se analizaron dos ambientes de modelación: urbano y rural. Se determinaron las concentraciones de PST y MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), durante 18 días por medio de monitoreo a través de dos estaciones ubicadas en el hospital del municipio y en la vereda salamanca encontrando que superan los límites permisibles (100 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), fijados en la Resolución 610 de 2010 del MAVDT.

Se analizó la información meteorológica y topográfica complementada con el inventario de fuentes de emisión como información de entrada para el proceso de modelamiento de contaminantes atmosférica emitida por coquización. El promedio geométrico de la concentración para el periodo de muestreo en la estación A fue de 103.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el aritmético de 107.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la resolución 610 de 2010 presenta los niveles máximos permisibles para PST de 100 y 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición anual y de 24 horas respectivamente. El promedio geométrico de la concentración para el periodo de muestreo en la estación B fue de 130.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el aritmético de 134.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la resolución 610 de 2010 presenta los niveles máximos permisibles para PST de 100 y 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición anual y de 24 horas respectivamente (Ramos Moreno , 2017).

Forero Daniel, en 2019, presentó la metodología para la incorporación de datos del sensor TROPOMI al monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá, Colombia. Los contaminantes considerados para el estudio fueron: Monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y ozono (O_3). Estos datos fueron comparados con la información proporcionada por las estaciones de monitoreo atmosférico entre agosto de 2018 y agosto de 2019, además, se consideró la influencia de diversas variables climáticas y meteorológicas.

El análisis muestra una similitud entre los datos obtenidos por las imágenes satelitales y los datos de las estaciones de monitoreo, revelando las zonas de mayor contaminación y las tendencias de las concentraciones; de esta forma se demuestra que las dinámicas de concentración de CO y NO_2 troposférico siguen la misma tendencia que las concentraciones de la superficie terrestre. Por otro lado, los datos troposféricos obtenidos de SO_2 difieren con las dinámicas de concentración terrestre, esto, entre otras cosas, puede deberse a la disponibilidad de información relativa a variables climáticas o meteorológicas (Forero Castro, 2019).

Por su parte, Cifuentes Lizette y Díaz Jean, en 2020, realizaron un análisis de la contaminación ambiental mediante el empleo de técnicas de percepción remota e imágenes satelitales LANDSAT 7 y 8 en el municipio de Medellín, Colombia. La metodología propuesta por los autores consta de cuatro etapas: 1.- Preprocesamiento de imágenes, 2.- Procesamiento de imágenes y cálculo de índices, 3.- Interpolación de variables de calidad de aire y 4.- Análisis de

componentes principales. Para ese trabajo fueron considerados los siguientes contaminantes: Dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3) y material particulado $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} . La cartografía resultante demostró que los principales puntos de contaminación en Medellín se encontraron en la zona centro de la ciudad y en zonas aledañas al Aeropuerto Olaya Herrera; esto puede encontrar explicación en el hecho de que estos puntos cuentan con muy poca cobertura vegetal (Tello Cifuentes & Díaz Paz, 2020).

En el departamento de Manizales, durante 2020, Serna David, Angulo Jesús, Duque Mario, Zuluaga Helena y Velasco Mauricio, realizaron un estudio sobre la evolución de la calidad del aire durante la cuarentena por Covid-19. Para el estudio fueron considerados contaminantes criterio como dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3), los cuales, fueron monitoreados mediante imágenes de satélite capturadas por el sensor TROPOMI. El monitoreo estuvo acompañado de un seguimiento de los reportes semanales proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), permitiendo confirmar la información contenida en las imágenes.

Los resultados respecto al CO demuestran una reducción en los picos de concentración con valores que no superan los $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, a medida que las actividades económicas se reactivaban, estos picos volvían a incrementarse hasta en un 18%. Respecto al O_3 , los valores calculados al inicio de la pandemia se encontraban en $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por el contrario, estos valores disminuirían en un 8%, con concentraciones promedio de $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último, los resultados obtenidos para SO_2 revelan concentraciones normales de $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, presentando una reducción de hasta el 49% a causa de las restricciones de circulación y movilidad, resultando en valores de aproximadamente $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gálvez Serna, Angulo Cuero, González Duque, Aristizábal Zuluaga, & Velasco García, 2020).

La Secretaría de Energía de Argentina (2020), realizó un estudio comparativo de calidad del aire mediante el monitoreo atmosférico de dióxido de nitrógeno (NO_2) entre el mes de marzo de 2019 y marzo de 2020. El análisis fue llevado a cabo con imágenes del satélite Sentinel-5P y datos extraídos de la plataforma Google Earth Engine. Respecto a las concentraciones de NO_2 , se puede observar una disminución en la atmósfera de este contaminante en los centros poblacionales más importantes de Argentina como Buenos Aires, Córdoba, Rosario, Mendoza y San Miguel de Tucumán. Esta disminución de las concentraciones de NO_2 puede encontrar su explicación en el hecho de que el país se encontraba en cuarentena por efectos del virus COVID-19, reduciendo las actividades antropogénicas que emiten contaminantes al ambiente (Secretaría de Energía de Argentina, 2020).

En 2020, Ialongo, Virta, Eskes, Hovila y Douros, realizaron una comparación de las observaciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) capturadas por el sensor TROPOMI y las mediciones realizadas en tierra, en Helsinki, Finlandia. Las columnas totales se compararon con las mediciones realizadas por el espectrómetro Pandora entre abril y septiembre de 2018. El sesgo medio relativo y absoluto entre el TROPOMI y

Pandora NO₂ el total de columnas es de aproximadamente el 10% y $0,12 \times 10^{15}$ mol/cm² respectivamente. La dispersión de estas diferencias (estimada como su desviación estándar) es 2.2×10^{15} mol/cm².

Encontramos una alta correlación ($r = 0,68$), entre los datos satelitales y terrestres, pero también que las columnas totales de TROPOMI subestiman las observaciones terrestres para Pandora. Tanto los datos satelitales como los terrestres mostraron un ciclo semanal similar, con niveles parecidos de NO₂ durante el fin de semana en comparación con los días laborables, esto como resultado de la reducción de las emisiones del tráfico y las actividades industriales (como se esperaba en los sitios urbanos). Los mapas revelaron también características espaciales, como las principales vías de tráfico y el área del aeropuerto, así como el efecto de los patrones de viento predominantes del suroeste (Ialongo, Virta, Eskes, Hovila, & Douros, 2020).

Para el 2021, Bigdelim, Taheri y Mohammadian relacionaron los casos de infecciones por COVID-19 con cuatro contaminantes atmosféricos en la República Islámica de Irán. La interpretación fue realizada mediante datos extraídos del satélite Sentinel 5P, mientras que los contaminantes evaluados fueron: Dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), los cuales fueron monitoreados del 19 de febrero al 22 de marzo de 2020 en las 31 provincias que conforman el país. Las cifras referentes a casos de COVID-19 fueron extraídas de la página oficial del Ministerio de Salud y Educación Médica, encontrando el número máximo de casos en las provincias de Teherán, Isfahán y Mazandaran. Los resultados de la investigación revelaron que, cada provincia mostró diferentes coeficientes de impacto en el lapso analizado, siendo Semnan, Qom, Yazd y Markazi las que mostraron un mayor índice de afectación (Bigdeli, Taheri, & Mohammadian, 2021).

Durante el mismo año, Guerrero Álvaro y Vásquez David presentaron, en su trabajo de tesis, una evaluación de datos satelitales del sensor de calidad del aire TROPOMI para el Ecuador, entre los años 2018 y 2020. La obtención de imágenes satelitales se logró mediante la plataforma Google Earth Engine en tiempo real, mientras que los datos de los contaminantes CO, NO₂ y O₃ fueron recuperados de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). La metodología empleada sugirió una correlación de variables troposféricas y terrestres para cada uno de los contaminantes evaluados, en donde se concluyó que ambas variables comparten similitud en su comportamiento; esta correlación fue expresada mediante gráficos de tiempo en donde se observó una disminución en las concentraciones de contaminantes durante el periodo de aislamiento provocado por el virus Covid-19. Los coeficientes de correlación de Pearson aplicados para cada contaminante arrojaron valores muy cercanos a 0 y alejados de 1, lo que indica una relación positiva nula (correlación perfecta), para los tres casos (Arboleda Guerrero & Vásquez Taco, 2021).

En 2021, Dutta Venkatesh, Kumar Saroj y Dubey Divya, publicaron un artículo relativo a los avances recientes en el mapeo satelital de la calidad del aire mundial y su importancia en la pandemia de Covid-19. Los datos diarios de teledetección a escala mundial de NO₂, fueron medidos a través del Instrumento de Monitoreo Troposférico Precursor Copernicus Sentinel-5 (S5p/TROPOMI), de la Agencia Espacial Europea (ESA). Una disminución significativa de NO₂ se observó en muchas ciudades de China debido a los estrictos confinamientos impuestos en febrero de 2020. Del mismo modo, se apreció una disminución en los niveles de NO₂ en Europa Occidental y Estados Unidos de hasta 38%. La columna se redujo en casi un 50% en varias partes de Asia durante el mismo período, además, los niveles de partículas con un tamaño inferior a 2,5 micras también se redujeron hasta un 35% en el norte de China (Dutta, Kumar, & Dubey, 2021).

Lozada Lissette y Jiménez Anifer, en 2021, realizaron un estudio sobre los modelos parametrizados de calidad de aire con base en sensores remotos en el distrito metropolitano de Quito, Ecuador, entre los años 2016 y 2019. Para dicho estudio se obtuvieron modelos matemáticos para la predicción de compuestos contaminantes presentes en el aire ambiente: dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), material particulado PM_{2.5} y dióxido de azufre (SO₂).

En el estudio se empleó imágenes tomadas por el satélite Sentinel-2, Productos MODIS Aerosol MAIAC y la base de datos de monitoreo de contaminantes atmosféricos de la REMMAQ para los años 2016, 2017, 2018 y 2019. El estudio arrojó diez modelos de regresión lineal, 4 por año para cada sensor y 1 general para cada sensor, al validar los datos se demostró que, de todos los modelos obtenidos, únicamente hay dos que destacan por tener un buen ajuste con la línea de regresión, estos modelos son el MCD19A2 GENERAL y el MCD19A2 2016. Con esto se determina que los productos MODIS Aerosol MAIAC dan un mejor resultado en una regresión lineal que las imágenes del satélite Sentinel.2, esto debido a la cantidad de datos con la que se cuenta (Arboleda Lozada & Neto Jiménez, 2021).

1.2 Ámbito nacional

En septiembre de 2002, Carbajal Gerardo y Cuevas Ángel realizaron un monitoreo de la contaminación ambiental en la Ciudad de México mediante imágenes del satélite meteorológico GOES8. Este análisis se centra en cuatro días específicos (15, 16, 17 y 18 de enero de 2002) donde tuvieron incidencia eventos de contaminación muy altos. La obtención de las imágenes satelitales se logró mediante el implemento de la banda visible del satélite GOES8, esta información fue posteriormente comparada con los datos de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), misma que reportó índices elevados de ozono (O₃) y material particulado PM₁₀. Los resultados obtenidos indican que, la dispersión de los contaminantes fue hacia la parte sur y suroeste de la Ciudad de México, afectando principalmente a los estados de México y Morelos (Carbajal Benítez & Terán Cuevas, 2002).

Un estudio similar fue realizado, en 2011, por el ingeniero en biónica Edgar Arellano, el cual realizó una evaluación de aerosoles troposféricos del Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) por medio de imágenes de Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES). Esta evaluación fue comparada con la información contenida de las bases de datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) para óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO) y material particulado $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} .

Las imágenes satelitales junto con el algoritmo basado en la reflexión solar indicaron variaciones locales y estacionales del Aerosol Optical Depth (AOD) de los aerosoles. Los resultados indicaron que es posible afirmar que la profundidad óptica del canal visible del satélite GOES, tiene la capacidad de predecir las variaciones de concentración diaria de contaminantes criterio a escala regional (Arellano Hernández, 2011).

En 2016, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó un diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México. Para complementar el estudio, fueron utilizadas imágenes de satélite, así como el modelo WRF-Chem. En el monitoreo de calidad del aire se realizaron visitas técnicas a redes de monitoreo de la CAME que incluyen la ciudad de Puebla y Toluca. Se identificaron en cada una de las redes las estaciones que son aptas para la activación de un posible programa de contingencia ambiental (PCAA) y aquellas que poseen otra función.

En Puebla las estaciones Agua Santa, BIME, San Martín Texmelucan y Atlixco debido a su ubicación y emisiones cercanas no son aptas para un PCAA. En Toluca las estaciones Oxtotitlán y Toluca centro son adecuadas para mediciones de fuentes vehiculares lo cual las excluye de ser útiles en un PCAA. Los estudios muestran una interacción entre las cuencas del centro de México y los patrones de viento y ventilación que se presentan cuando se tiene altos niveles de ozono; del mismo modo, se identificaron los sitios por donde se da el intercambio entre cuencas y algunas de las condiciones meteorológicas que los favorece (SEMARNAT, Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México, 2016).

Cruz Núñez Xóchitl y Bulnes Aquino Estefanía (2019), evaluaron el potencial de afectación de un incendio forestal en el Parque Nacional “El Tepozteco” en el estado de Morelos, México, sobre la salud de los pobladores asentados en los alrededores de dicho sitio. El cálculo de las variables lo realizaron mediante simulaciones con el modelo HYSPLIT, con el cual se estimaron las trayectorias de los contaminantes; asimismo se realizó una simulación para determinar la concentración de los contaminantes en relación con la distancia a los centros de población. Los resultados demostraron que los habitantes de las poblaciones no se encontraron expuestos al riesgo que representaba la presencia de contaminantes en la atmósfera (Cruz Núñez & Bulnes Aquino, 2019).

2.- Marco Conceptual

En el presente capítulo se pretende recopilar, exponer y sistematizar conceptos y datos importantes que sean de utilidad e interés para el tema de investigación: *“Análisis de la contaminación atmosférica en la República Mexicana, mediante imágenes satelitales EO BROWSER”*.

El capítulo se encuentra estructurado en cuatro subtemas: 2.1 Atmósfera; 2.2 Contaminación; 2.3 Percepción remota en Sistemas de Información Geográfica; 2.4 EO BROWSER.

Cada subtema está conformado por conceptos relativos al enfoque general de la investigación. Dicha estructuración permite un análisis más específico de temas como: componentes del clima, contaminantes criterio, fuentes de emisión, variables climatológicas, percepción remota, además de un contexto general de las características y funciones que ofrece el portal web EO BROWSER respecto a la obtención y manejo de imágenes satelitales. Estos conceptos ofrecen un panorama más completo sobre el funcionamiento de la atmósfera en relación con la contaminación.

2.1 Atmósfera

La atmósfera es una mezcla de gases que se extiende desde la superficie terrestre hasta aproximadamente 100 kilómetros de altura. Es esencial para la vida en nuestro planeta, ya que proporciona el aire que respiramos, regula el clima y protege a la Tierra de la radiación solar dañina. Está compuesta principalmente por nitrógeno (aproximadamente el 78%), oxígeno (alrededor del 21%), y trazas de otros gases como argón, dióxido de carbono, neón y metano, entre otros. Estos gases interactúan entre sí y con la radiación solar para crear una serie de fenómenos atmosféricos, como la formación de nubes, los vientos y la lluvia. La atmósfera se divide en varias capas principales: la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la termosfera y la exosfera. Cada capa tiene características diferentes en términos de temperatura, presión y composición de gases (GVA, 2023).

2.1.1 Circulación general de la atmósfera

El planeta Tierra, modifica su temperatura mediante la presencia de una atmósfera y el calor recibido por el Sol. Este sistema irradia la misma cantidad de energía recibida, de vuelta al espacio, de forma tal que, se mantiene un equilibrio en la temperatura global; este tipo de procesos donde, el calor es variable, se lleva a cabo mediante los movimientos atmosféricos a escala planetaria, llamados comúnmente “circulación general”; de acuerdo con Wexler (1995), *“de no existir esta circulación, en un mundo sin vientos, los trópicos se volverían intolerablemente calientes y el resto del planeta se tornaría muy helado, las ciudades se ahogarían en sus propias emanaciones tóxicas. Por otra parte, si cesara de pronto la fuente de energía que mueve a la atmósfera, los vientos desaparecerían en unos 12 días ya que la pérdida*

de energía por fricción entre el viento y la superficie de la tierra sería significativa” (Jáuregui Ostos, 2003).

2.1.2 Funcionamiento de los vientos

El viento se produce debido al desplazamiento del aire desde zonas de alta presión hacia zonas de baja presión, resultado del calentamiento desigual de la Tierra por efecto del sol. Es crucial distinguir entre el aire caliente y el aire frío. Mientras que el aire frío tiende a moverse cerca del suelo, el aire caliente asciende. Estas áreas de movimiento, que pueden abarcar cientos de kilómetros, se denominan zonas ciclónicas y anticiclónicas. Comúnmente, el viento se caracteriza por dos aspectos: su dirección, indicada por el punto cardinal de donde proviene, y su fuerza, determinada por la rapidez con la que se mueven las partículas del aire (CEUPE, 2023).

Como parte de la circulación general de la atmósfera, encontramos con tres formas de funcionamiento del viento:

- a) Vientos contralisios: el calor en el ecuador hace que el aire suba y se mueva hacia el norte y el sur. Este fenómeno genera muchas nubes y lluvias constantes en el ecuador a lo largo del año.
- b) Vientos alisios: los vientos soplan con regularidad durante el verano del hemisferio Norte y de manera más esporádica en invierno. Afectan principalmente entre el ecuador y los trópicos, llegando aproximadamente hasta los 30° de latitud en ambos hemisferios. Estos vientos tienen una intensidad moderada, con una velocidad promedio cercana a los 20 km/h.
- c) Vientos occidentales (westlires): del aire frío que desciende, una parte se dirige al ecuador para formar los vientos alisios, o hacia los polos, para formar los llamados “westlires”.

2.1.3 Células atmosféricas

El movimiento atmosférico de nuestro planeta se entiende mediante un modelo teórico que sugiere tres extensas células en cada hemisferio. Estas células desempeñan un papel clave en la transferencia de calor entre las zonas polares y el ecuador. La presencia de estas células explica las principales dinámicas del viento y las variaciones de alta y baja presión en el sistema atmosférico (CEUPE, 2023).

- a) Célula de Hadley: Se trata de una célula de movimiento atmosférico cerrado que abarca desde el Ecuador hasta aproximadamente 30° de latitud en cada hemisferio. Este calor se mueve en un patrón celular convectivo, donde el aire calentado se eleva en la zona ecuatorial y avanza hacia latitudes más altas. Junto con este levantamiento de aire

cálido, se observan tormentas convectivas, especialmente en la región de convergencia intertropical.

- b) Célula de Ferrel: Se ubica entre la célula de Hadley y la Polar, abarcando desde los 30° hasta los 60° en ambos hemisferios. Su existencia se basa en las células de Hadley y Polar. Actúa como una célula atmosférica que se balancea entre las otras dos, dando lugar a circulaciones en espiral, razón por la cual se denomina "región de mezcla". A diferencia de las otras, no es una célula completamente cerrada. En esta célula, el aire próximo a la superficie se mueve hacia los polos y al este, mientras que el aire en altitudes mayores se dirige hacia el ecuador y al oeste. Esta es la razón de los llamados vientos del oeste o vientos predominantes del oeste.
- c) Células polares: Están ubicadas entre las latitudes de 60° y 90° en cada hemisferio. Son originadas por el frío polar y crean altas presiones constantes que mueven el aire frío de la superficie hacia áreas de baja presión. Al calentarse, este aire asciende y regresa nuevamente hacia los polos.

2.1.4 Efecto Coriolis

El planeta Tierra rota de Oeste a Este, en dirección opuesta a las manecillas del reloj, y su velocidad de giro es más lenta en los polos que en el Ecuador. A causa de las fuerzas de Coriolis, cualquier fluido que se mueva horizontalmente sobre la superficie terrestre tiende a desplazarse hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el hemisferio Sur. Esta fuerza surge cuando un objeto se mueve en relación a un sistema giratorio. Siempre actúa en ángulo recto tanto al eje de rotación del sistema como a la trayectoria del objeto, vista desde el punto de vista del sistema rotativo.

2.1.5 Clima

En México, varios factores influyen en el clima, como la altitud, la latitud y la configuración de tierra y agua, entre otros. Se han categorizado 7 principales climas en el país. Los más predominantes son: subhúmedo cálido, seco y semiseco, y desértico seco. Mientras que los climas con menor presencia son: húmedo cálido, subhúmedo templado, húmedo templado y, con la menor área, el clima frío (SEMARNAT, 2020).

2.1.5.1 Temperatura

La temperatura es un componente esencial de los climas terrestres y se refiere a la energía térmica presente en el aire. En México, se utiliza como unidad de medida los grados Celsius (°C) y comúnmente se determina usando termómetros. Según cifras de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la media de temperatura

durante 2019 y 2020 fue de 22.4 °C. Estos dos años, junto con 2017, se catalogaron como los más cálidos desde 1953 (CONAGUA, 2021).

2.1.5.2 Humedad relativa

Se refiere a la proporción de vapor de agua en el aire comparado con la cantidad máxima que el aire podría contener a una temperatura específica. Así, a mayor temperatura, el aire tiene la capacidad de retener más vapor de agua. Se mide en términos porcentuales. Un valor del 100% significa que el aire ha alcanzado su capacidad máxima de retención de vapor, lo que puede conducir a la formación de nubes, nieblas, rocío o, en condiciones de bajas temperaturas, escarcha. Para medir la humedad relativa se utiliza un instrumento llamado higrómetro (AEMeT, 2022).

2.1.5.3 Viento

Es el desplazamiento del aire en la atmósfera, moviéndose de áreas de alta presión hacia áreas de baja presión. A pesar de que el aire se mueve en todas las direcciones del espacio, en términos meteorológicos, sólo se considera su velocidad y dirección en el plano horizontal. El anemómetro es el instrumento utilizado para medir la velocidad del viento, generalmente en m/s o km/h. Por otro lado, la dirección del viento se determina con una veleta, indicando en grados desde el norte, y señala de dónde proviene el viento (AEMeT, 2022).

2.1.5.4 Presión atmosférica

Representa el peso del aire que se encuentra sobre una superficie específica. Se mide en pascuales (Pa), que es lo mismo que un newton por metro cuadrado (N/m²). Sin embargo, debido a que esta medida es bastante pequeña, se usa comúnmente el hectopascal (hPa) o, de manera equivalente, el milibar (mbar). A medida que ascendemos en altitud, la presión atmosférica disminuye (AEMeT, 2022).

2.1.5.5 Precipitación

Se refiere al descenso de agua presente en la atmósfera hacia la superficie terrestre. Esta puede presentarse como agua líquida, nieve, bruma o rocío. El fenómeno ocurre cuando la atmósfera alcanza su capacidad máxima de retención de agua, provocando su condensación y posterior caída. Se cuantifica en litros por metro cuadrado (l/m²) o, de manera equivalente, en milímetros que indican la altura del agua acumulada (mm). Para medir la precipitación se utiliza el pluviómetro (AEMeT, 2022).

2.1.5.6 Nubosidad

Se refiere a la proporción del cielo que está cubierta por nubes en un lugar específico. Para medirla, se segmenta el cielo en ocho partes, y se utiliza la unidad "octas". Un valor de 0/8 indica un cielo sin nubes, mientras que un valor de 8/8 significa que el cielo está totalmente nublado (AEMeT, 2022).

2.2 Contaminación

2.2.1 Contaminación ambiental

La contaminación del aire o ambiental se refiere a la introducción de agentes (ya sean físicos, químicos o biológicos) en ciertos lugares, en formas y concentraciones que pueden perjudicar la salud, seguridad y bienestar de los seres humanos y otras formas de vida. Esta polución también implica la adición de sustancias sólidas o líquidas en entornos, alterando sus condiciones naturales o comprometiendo la salud y comodidad de la población. En su mayoría, estas alteraciones negativas al medio ambiente se originan debido a acciones humanas (Conde Williams, 2013).

2.2.2 Contaminación atmosférica

La contaminación del aire es una preocupación creciente debido a los impactos adversos que provoca en los ecosistemas naturales y sociedades a nivel mundial. Sus causas se pueden dividir en dos categorías: aquellas de origen natural, como incendios forestales, erupciones volcánicas o cambios en la temperatura global, y las originadas por actividades humanas, como quemas descontroladas, emisiones de maquinaria o el manejo incorrecto de materiales peligrosos. Se caracteriza por la emisión, ya sea directa o indirecta, a la atmósfera de agentes o energías perjudiciales. Estos pueden perjudicar la salud humana, afectar a la biodiversidad y ecosistemas, deteriorar bienes materiales, interferir en actividades recreativas y comprometer otros usos del entorno (Martínez Gutiérrez , 2018).

2.2.3 Origen de los contaminantes

Según su origen, pueden ser clasificados en contaminantes primarios y secundarios.

Contaminantes primarios: son sustancias emitidas directamente a la atmósfera y cuya composición no ha sufrido variaciones, incluidos los aerosoles o partículas, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono (SMADSOT, 2021).

Contaminantes secundarios: los contaminantes secundarios son sustancias que se producen como consecuencia de las transformaciones, reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera (SMADSOT, 2021).

2.2.4 Contaminantes criterio

Los contaminantes criterio son sustancias que se liberan en grandes cantidades de gran variedad de fuentes y presentan un riesgo a la salud y bienestar humano. Con base en las afecciones fisiológicas que poseen algunos de los contaminantes atmosféricos, algunos de ellos se han normado con límites máximos permisibles y

se han establecido guías para los mismos, mediante recomendaciones para los niveles de exposición; manejándose todo en diferentes países del mundo. Estas sustancias adquieren el nombre de “Contaminantes criterio” (Domínguez Arce, 2015), siendo estos:

- Monóxido de Carbono (CO)
- Ozono (O₃)
- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)
- Partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})

2.2.4.1 Ozono (O₃)

El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno y es inestable por naturaleza. Se encuentra en dos capas de nuestra atmósfera: la estratosfera (de 10 a 50 km) y la troposfera (de 0 a 10 km). A pesar de que el ozono en la estratosfera representa una mínima parte de la atmósfera total, es esencial para la vida en la Tierra. Este ozono actúa como un escudo, protegiendo a los organismos vivos de la radiación ultravioleta-B (UV-B) del Sol. Sin esta barrera, aumentaría el riesgo de afecciones como cáncer de piel, cataratas y problemas en el sistema inmunitario. Por el contrario, el ozono presente en la troposfera es nocivo, afectando tanto a la salud pulmonar humana como a la vegetación. Los niveles de ozono en ambas capas atmosféricas dependen de un equilibrio entre los procesos de formación y destrucción de esta molécula (Aires, 2012).

El ozono es un contaminante secundario. Las sustancias que intervienen en la formación de ozono en la atmósfera inferior se denominan "precursores del ozono troposférico", principalmente los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el monóxido de carbono (CO) (SMADSOT, 2021).

2.2.4.2 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Es un sólido incoloro, líquido amarillento o gas rojizo. Se descompone en agua formando ácidos nítrico y nitroso y NO; reacciona con álcalis para dar nitratos y nitritos (INSST, 2018).

La mayoría de las emisiones humanas de óxidos de nitrógeno provienen del óxido nítrico (NO), el cual se libera principalmente al quemar combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Este óxido nítrico, una vez liberado, se oxida y se transforma en dióxido de nitrógeno (NO₂) y, a continuación, en ácido nítrico (HNO₃), actuando estos últimos como contaminantes secundarios (SMADSOT, 2021).

2.2.4.3 Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas que no tiene color ni olor y se forma cuando la materia orgánica se quema de manera incompleta sin suficiente oxígeno. Es uno de

los principales contaminantes en la atmósfera y representa un significativo problema ambiental en América Latina. Debido a su alta capacidad de unión, el monóxido de carbono se adhiere fácilmente a los átomos de hierro en los citocromos, particularmente a los que participan en la cadena respiratoria mitocondrial. Esto impide que los tejidos del organismo utilicen eficientemente el oxígeno (Téllez, Rodríguez , & Fajardo, 2006).

El monóxido de carbono (CO) es el contaminante predominante en la parte más baja de la atmósfera. Su fuente principal, de origen humano, proviene de la combustión no completa de sustancias orgánicas, como el gas, carbón y madera, siendo especialmente significativa la emisión proveniente de los vehículos. Al experimentar oxidación en la atmósfera, se convierte en dióxido de carbono (CO₂) (SMADSOT, 2021).

2.2.4.4 Dióxido de azufre (SO₂)

Es un gas inodoro, no inflamable y con un olor fuertemente irritante. En la atmósfera, su permanencia es de 2 a 4 días. Cerca de la mitad de sus emisiones regresan a la superficie terrestre, mientras que la otra mitad se convierte en iones sulfato (SO₄²⁻). Es una sustancia que tiende a transformarse en trióxido de azufre al interactuar con el aire y la humedad. Al disolverse en agua, produce una solución ácida y, aun en ese estado, puede descomponerse generando sulfitos y bisulfitos. Desempeña un papel fundamental en la elaboración de ácido sulfúrico, proceso que inicia con la combustión del azufre puro y su posterior oxidación a trióxido de azufre (SO₃), que finalmente puede transformarse en ácido sulfúrico (Contaminantes, 2007).

2.2.4.5 Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)

Las PM₁₀ son partículas suspendidas en la atmósfera, ya sean sólidas o líquidas, compuestas por elementos como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen. Estas partículas tienen un diámetro que oscila entre 2,5 y 10 µm. Están constituidas en su mayoría por sustancias inorgánicas como silicatos y aluminatos, metales pesados y materiales orgánicos ligados a partículas de carbono. Su pH tiende a ser básico, resultado de la combustión no regulada de diversos materiales.

En cuanto a sus fuentes de emisión, tanto móviles como estacionarias contribuyen a su presencia. Es relevante mencionar que un notable 77,9% de las emisiones de PM₁₀ provienen del polvo ambiental. Por otro lado, sectores como la industria, construcción y comercio aportan un 7,6%, mientras que el transporte vehicular contribuye con un 6,5%. Otras fuentes menos predominantes incluyen quemas agrícolas, que representan el 3,7%, y fuentes domésticas con un 3,3% (PRTR, 2022).

2.2.4.6 Partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})

Las PM_{2.5} se refieren a partículas en suspensión en el aire con un diámetro de 2.5 micrómetros o menos. Estas diminutas partículas, compuestas por elementos como polvo, hollín, cenizas y compuestos químicos, son motivo de especial preocupación ya que al ser inhaladas se alojan profundamente en los pulmones, causando diversos problemas de salud. Una exposición continuada a PM_{2.5} puede desencadenar afecciones respiratorias como asma y bronquitis, así como enfermedades cardiovasculares y, en casos graves, cáncer pulmonar. Las emisiones de PM_{2.5} provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles, vehículos, industrias, incendios forestales y polvo en el aire (OEHHA, 2023).

2.2.5 Fuentes de emisión de los contaminantes criterio

La contaminación atmosférica encuentra su origen en la emisión, acumulación y combinación de contaminantes en el aire, provenientes de fuentes naturales (volcanes y plantas) y fuentes antropogénicas (industrias, servicios y vehículos). (SIAC, 2020)

Según la forma en que se emite el contaminante al aire, las fuentes de emisión son clasificadas en: fuentes fijas, cuando las emisiones se generan en un lugar determinado y estacionario (industria) y fuentes móviles, en las que las emisiones son generadas por una fuente en desplazamiento (vehículos) (SIAC, 2020).

- **Fuentes fijas:** cada unidad está ubicada en un solo lugar y está relacionada con actividades industriales, comerciales, operativas o de explotación que puedan implicar o provocar la emisión de contaminantes a la atmósfera (SEMARNAT, 2011).
- **Fuentes móviles:** los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses integrales, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijos con motores de combustión y similares, que puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera (SEMARNAT, 2011).

2.2.6 Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son sustancias presentes en la atmósfera que tienen la capacidad de retener calor, lo que contribuye al aumento de la temperatura promedio en la superficie terrestre. Se les compara con las paredes de vidrio de un invernadero debido a que, de manera similar, atrapan el calor dentro. La energía solar que llega a la Tierra atraviesa la atmósfera, y alrededor de la mitad de esta energía es absorbida por la superficie del planeta, calentándola. A su vez, la superficie emite esta energía de regreso al espacio en forma de radiación infrarroja.

Sin embargo, los gases de efecto invernadero capturan alrededor del 90% de esta radiación, evitando que escape completamente al espacio. Aunque estos gases constituyen solo el 0.1% de la atmósfera, su presencia es crucial para mantener una temperatura adecuada en la Tierra y, por ende, influyen notablemente en los sistemas climáticos del planeta (INECC, 2022).

2.2.6.1 Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) es una medida que indica la capacidad de un gas de efecto invernadero para atrapar el calor en la atmósfera, comparado con el dióxido de carbono. Se evalúa considerando la duración que el gas permanece en la atmósfera y su efectividad en retener calor. El GWP es una herramienta útil para comparar la intensidad con la que diferentes gases contribuyen al efecto invernadero. Al establecer al dióxido de carbono (CO₂) como el gas de referencia con un GWP de 1 en un periodo de 100 años, se permite cuantificar y comparar el impacto de otros gases de efecto invernadero en relación al CO₂ durante ese mismo lapso de tiempo (eurostat, 2014).

2.2.7 Aerosoles

Las partículas suspendidas, también conocidas como aeropartículas o aerosoles, hacen referencia a una combinación de partículas líquidas y sólidas que flotan en el aire. Estas pueden tener diferentes orígenes, incluyendo la emisión de vehículos, las centrales eléctricas, reacciones fotoquímicas, procesos mecánicos, y actividades cotidianas humanas como cocinar o limpiar. Dos de las características más relevantes de estas partículas son su tamaño y composición, ya que determinan cómo interactúan con el ambiente, su permanencia en la atmósfera y el impacto que pueden tener tanto en el medio ambiente como en la salud humana (Rojas Bracho & Garibay Bravo, 2003).

2.2.7.1 Propiedades generales

Existen diversas propiedades físicas-radiativas asociadas a los aerosoles:

- **Tamaño:** el rango de tamaños de los aerosoles va desde 0.001 micrómetros hasta más de 100 micrómetros (visibles) (Préndez, Ortíz, Zolezzi, Campos, & Apablaza, 1991).
- **Tiempo de vida:** el tiempo de vida de partículas de aerosoles troposféricos es de días a semanas y de aerosoles estratosféricos es de años (IPCC Supplementary Report, 1992).
- **Precusores:** gases tales como el SO₂ e Hidrocarburos (IPCC Working Group I, 1990).
- **Remoción:** Las partículas de aerosol que contribuyen a los efectos radiativos se remueven gracias a procesos de precipitación (IPCC Supplementary Report, 1992).

- **Comportamiento con radiación de onda larga:** La opacidad de los aerosoles disminuye (IPCC Supplementary Report, 1992).
- **Mayor concentración (presencia):** Los aerosoles se concentran en capas bajas de la troposfera, donde la temperatura, que además tiene injerencia en las emisiones, es prácticamente igual a la temperatura de la superficie terrestre (IPCC Supplementary Report, 1992).

2.2.7.2 Forzamiento radiativo

El cambio climático es influenciado por diversos factores que afectan el balance energético de la Tierra. Uno de estos factores es el forzamiento radiativo, que es el cambio en la energía recibida por la superficie terrestre a causa de elementos contaminantes, como el ozono (O_3). La nomenclatura "radiativo" deriva de la influencia que estos contaminantes tienen sobre la radiación solar que llega a la Tierra y la radiación infrarroja que la superficie emite de vuelta hacia el espacio. Este equilibrio entre la energía que entra y sale determina la temperatura global de nuestro planeta. El "forzamiento" se refiere a cualquier perturbación en este equilibrio. Si la perturbación resulta en más energía entrante que saliente, puede dar lugar a un calentamiento global; inversamente, si la energía saliente es mayor, podría llevar a un enfriamiento global (IPCC, 2007).

2.2.7.3 Balance energético

La temperatura de un lugar específico está influenciada por la cantidad de calor que se almacena en ese sitio, y este calor depende de las transferencias de energía que ocurren allí. En términos generales, la Tierra recibe energía del sol, y esta cantidad promedio de energía se calcula dividiendo la irradiancia solar total, o constante solar, entre 4, lo que da como resultado un promedio de $340 \text{ J/m}^2\text{s}$. Sin embargo, no toda esta energía es absorbida por la Tierra. Una porción es reflejada de vuelta al espacio, y este porcentaje reflejado es lo que llamamos "albedo". La diferencia entre la energía solar que llega a la Tierra y la que es reflejada de regreso al espacio, junto con la energía que la Tierra emite de vuelta al espacio, constituye el "balance energético". Es este balance el que determina las condiciones térmicas de nuestro planeta y, por ende, influye en el clima y la temperatura de las diferentes regiones (IDEAM, 2022).

2.2.7.4 Albedo

Es una medida que indica cuán reflectante es una superficie con respecto a la radiación solar que incide sobre ella. Aunque esta capacidad reflectante puede variar dependiendo de la hora del día, la estación del año o la ubicación geográfica, el albedo representa la porción de energía solar que no se absorbe y, por lo tanto, no contribuye al calentamiento atmosférico. Dado que se expresa en términos porcentuales, un albedo del 0% significaría que una superficie absorbe toda la radiación, mientras que un albedo del 100% indica que toda la radiación es reflejada. A nivel global, la Tierra tiene un albedo promedio cercano al 30%, lo que significa

que, de toda la radiación solar que llega a nuestro planeta, aproximadamente el 30% es reflejado de vuelta al espacio, sin tener impacto en el calentamiento de la atmósfera (IDEAM, 2022).

2.2.7.5 Radiación

La energía que se libera en forma de radiación se propaga mediante ondas electromagnéticas, las cuales pueden variar en sus longitudes de onda. A la totalidad de estas longitudes de onda se le llama espectro electromagnético. Las longitudes de onda específicas emitidas por un objeto se conocen como espectro de emisión, y cuando nos referimos al sol, lo llamamos espectro solar. Al interactuar la radiación con un objeto, pueden ocurrir tres eventos distintos:

- 1.- Reflexión
- 2.- Absorción
- 3.- Transmisión

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectancia o albedo (ρ), la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptancia (α) y la transmitida transmitancia (τ). Los valores de ρ , τ y α varían en función del tipo de material de que se trate y en función de la longitud de onda (IDEAM, 2022).

2.2.8 Contaminación atmosférica en las principales zonas metropolitanas del país

A continuación, se muestran datos del Inventario Nacional de Emisiones, publicados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), relativos a las emisiones contaminantes en las principales zonas metropolitanas del país, durante el año 2016. Los datos tienen la función de ofrecer un panorama más completo sobre la situación en materia de concentraciones de gases contaminantes.

Tabla 2.1 Concentración de contaminantes por zona metropolitana, 2016

(Concentración en toneladas)	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x
Zona Metropolitana del Valle de México	26,434.1	15,619.96	2,281.51	738,974.9	202,716.2
Zona Metropolitana del Valle de Toluca	5,678.16	3,880.12	1,416.33	91,069.59	28,670.2
Zona Metropolitana de Guadalajara	10,783.22	7,213.19	3,875.51	219,268.24	61,568.84
Zona Metropolitana de Monterrey	14,113.14	9,506.57	16,602.61	226,496.17	99,108.89
Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala	19,012.72	16,202.97	6,962.97	151,303.09	55,868.11

Fuente: Elaboración propia con base en Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 2018.

2.2.9 Emisión de contaminantes por actividad en la República Mexicana

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las fuentes de emisión de los contaminantes se dividen en cuatro: Fuentes fijas, fuentes móviles, fuentes de área y fuentes naturales. Para efectos prácticos de estudio y relativos al tema del presente trabajo, se abordarán aquellas actividades de área, que tienen contribuyen significativamente a las concentraciones totales de contaminantes en la atmósfera.

Tabla 2.2 Emisiones de contaminantes por actividad económica

(Concentraciones en toneladas)	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x
Industria alimenticia	79,010.14	44,940.31	31,764.69	21,838.66	17,815.09
Industria automotriz	1,778.69	1,374.88	83.94	1,185.28	1,827.51
Celulosa y papel	1,478.61	1,236.43	7,630.58	1,805.37	4,210.00
Extracción de minerales no metálicos	3,876.96	2,195.56	1,532.85	164.05	1,075.50
Procesos de transformación de energía	52,398.58	39,944.45	68,3849.89	60,968	205,787.25
Industria metalúrgica	26,798.94	18,735.49	20,224.12	27,860.12	54,804.88
Petróleo y petroquímica	13,452.55	9,377.61	513,248.32	121,020.07	58,955.12
Industria química	3,018.84	2,180.65	16,458.77	4,639.36	9,316.01
Industria cementera	5,365.57	3,184.68	33,987.02	15,162.58	51,006.34

Fuente: Elaboración propia con base en Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 2018.

2.3 Percepción remota en Sistemas de Información Geográfica

2.3.1 Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es una herramienta informática diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y visualizar datos georreferenciados relacionados con la superficie terrestre. Estos sistemas permiten a los usuarios observar y entender patrones y relaciones geográficas a través de la representación en "mapas". Estas representaciones no solo muestran la geografía, sino también las características y fenómenos asociados. Además, los SIG modernos brindan la capacidad de compartir estos hallazgos en plataformas digitales, como sitios web y aplicaciones móviles, proporcionando interfaces amigables e interactivas. Son esenciales en áreas como la planificación urbana, gestión del territorio y análisis de movilidad. Los componentes fundamentales de un SIG incluyen cinco elementos clave (SGM, 2017).

- a) Datos: Información extraída de bases de datos o generada por el usuario, suministrada a la computadora para trabajarla y generar nueva información.
- b) Hardware: Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora.
- c) Software: Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinada tarea.
- d) Recursos humanos: Se refiere, en esencia a los usuarios que gestionan y operan los procesos pertinentes para el manejo de los datos.
- e) Esquema organizativo: Es la forma en que se estructura la forma de trabajo.

2.3.2 Softwares especializados

2.3.2.1 QGIS

QGIS es una plataforma de Sistema de Información Geográfica de código libre y abierto, bajo la licencia General Public License (GNU). Está equipado con una variedad de herramientas, tanto incorporadas como a través de complementos que se pueden añadir según las necesidades del usuario. Facilita la visualización, administración, edición y evaluación de datos geoespaciales. Además, cuenta con una funcionalidad para el diseño de mapas. Entre sus capacidades se incluyen herramientas para el análisis de datos vectoriales, manipulación de datos ráster, muestreo, geoprocesamiento, operaciones geométricas y la administración de bases de datos geográficas (QGIS, 2023).

2.3.2.2 ArcGIS

ArcGIS es una solución de software para la cartografía que posibilita recolectar, estructurar, gestionar, analizar y disseminar datos geoespaciales. Esta herramienta está disponible en múltiples plataformas: desde navegadores web hasta dispositivos móviles y computadoras tradicionales. Dentro de su gama de funcionalidades, ArcGIS provee herramientas para análisis espacial, trabajo con imágenes y teledetección, visualización y mapeo, modelado tridimensional, entre otras. También dispone de ArcGIS Online, una plataforma en la nube que facilita la creación, el acceso y la distribución de contenido geográfico, permitiendo a los usuarios colaborar y compartir sus proyectos cartográficos (ESRI, 2023).

2.3.2.3 SNAP

La plataforma de aplicaciones de Sentinel (SNAP) representa una base común para todas las herramientas asociadas a los satélites Sentinel. Esta plataforma ha sido diseñada por empresas como Brockmann Consult, Skywatch, Sensor y CS. SNAP ha sido estructurada para ser la solución óptima en el ámbito de la observación de la Tierra (EO) gracias a características innovadoras como su capacidad de extensión, su portabilidad, su diseño modular, una abstracción para datos de EO, una gestión eficiente de la memoria y una estructura diseñada para el procesamiento gráfico. Aunque esté diseñado principalmente para Sentinel, SNAP y sus herramientas asociadas son compatibles con diversos sensores más allá de los propios de Sentinel. Además, la Agencia Espacial Europea (ESA/ESRIN) ofrece SNAP sin coste para el beneficio y uso de la comunidad de observación de la Tierra (ESA, 2023).

2.3.3 Satélites

2.3.3.1 Sentinel-5P

El Sentinel-5P es un precursor de la misión Sentinel-5 y ha sido diseñado específicamente para reducir los vacíos de datos entre la desactivación del instrumento ENVISAT (Environmental Satellite) y el lanzamiento del Sentinel-5. Este satélite es una pieza crucial en el monitoreo de la atmósfera, ya que proporciona información diaria y global sobre la composición atmosférica con un alto nivel de detalle y precisión. El instrumento TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), a bordo del Sentinel-5P mapea una amplia gama de contaminantes del aire y es capaz de detectar fuentes de emisión y su dispersión. Es decir, puede identificar puntos de alta contaminación, observar la calidad del aire y monitorizar la capa de ozono en la estratosfera, entre otras tareas. Gracias a estas capacidades, Sentinel-5P desempeña un papel fundamental en la respuesta a los desafíos relacionados con el cambio climático y la seguridad de los ciudadanos. (ESA, 2020)

La misión Copernicus Sentinel-5P está diseñada específicamente para proporcionar datos detallados y actualizados sobre la atmósfera terrestre. Estos datos son

esenciales para monitorizar la calidad del aire, estudiar la capa de ozono, evaluar la radiación UV y mejorar la precisión de los pronósticos climáticos. El satélite ha sido programado para cruzar el ecuador a las 13:30h (hora local), coincidiendo con el satélite Suomi-NPP de la NASA. Esta coordinación es estratégica, ya que permite a Sentinel-5P aprovechar las imágenes de alta resolución de las nubes obtenidas por el instrumento VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) de Suomi-NPP. De esta forma, es posible obtener una interpretación más precisa y detallada de los datos recolectados por el instrumento TROPOMI en Sentinel-5P, ya que las condiciones de nubosidad pueden influir en las mediciones atmosféricas. En conjunto, esta colaboración y coordinación entre satélites refuerza la calidad y fiabilidad de los datos recogidos para estudios y aplicaciones atmosféricas (ESA, Sentinel-5, 2020).

2.3.3.2 Landsat 8

Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 desde California, a bordo de un cohete Atlas-V 401. Este satélite está equipado con dos instrumentos: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), los cuales capturan imágenes de la superficie terrestre con diferentes resoluciones dependiendo de la banda de luz capturada: 30 metros para la mayoría de las bandas, 100 metros para la térmica y 15 metros para la pancromática. El proyecto es una colaboración entre la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Mientras que la NASA gestionó el diseño, construcción y lanzamiento del satélite, el USGS tomó el control de las operaciones una vez que el satélite estuvo en órbita, renombrándolo como Landsat 8 y asumiendo las responsabilidades de calibración, operaciones y almacenamiento de datos en el centro Earth Resources Observation and Science (EROS) (NASA, 2023).

2.3.3.3 SPOT

La serie SPOT, abreviatura del término francés "Satellite pour l'Observation de la Terre", ha proporcionado imágenes ópticas de alta resolución de vastas áreas desde 1986. Fue desarrollada por el Centro Nacional Francés de Estudios Espaciales (CNES). Entre 1986 y 2015, se lanzaron cinco satélites de esta serie, los cuales han permitido una observación detallada de la superficie terrestre, abriendo puertas a innovadoras aplicaciones en áreas como mapeo, monitoreo de vegetación, análisis de uso y cobertura del suelo, y evaluación de las repercusiones de catástrofes naturales. Los más recientes, SPOT 6 y SPOT 7, son satélites comerciales propiedad de Airbus Defence and Space, garantizando la disponibilidad de datos hasta al menos 2024. Todos los satélites SPOT ofrecen imágenes en bandas pancromáticas y multiespectrales con una cobertura de 60 km de ancho. Además, SPOT forma parte del Programa de Misiones de Terceros de la Agencia Espacial Europea (ESA), que ha establecido un acuerdo con Airbus Defence and Space para la distribución de datos de la misión (ESA, 2023).

2.3.3.4 EOS

El Sistema de Observación de la Tierra (EOS), de la NASA es un conjunto de satélites coordinados diseñados para monitorear la Tierra desde una órbita polar y baja. Estos satélites se encargan de observar de manera continuada aspectos como la superficie terrestre, la biosfera, el interior terrestre, la atmósfera y los océanos, proporcionando datos esenciales para el estudio de la Tierra como un sistema interconectado. Al formar parte crucial de la División de Ciencias de la Tierra dentro de la Dirección de Misiones Científicas de la NASA, el EOS facilita un entendimiento más profundo de las interacciones y dinámicas terrestres. Además, la Oficina de Ciencias del Proyecto EOS se dedica activamente a compartir información y recursos relacionados con el programa, beneficiando tanto a la comunidad científica como al público general (NASA, 2022).

2.4 EO BROWSER

2.4.1 Características generales

EO Browser es una herramienta creada por Sinergise, que ofrece acceso a una variedad de imágenes satelitales, incluyendo las series Sentinel, Landsat, Modis, V-Test y GIBS. A través de Sentinel Hub, EO Browser facilita la conexión a múltiples bases de datos, tanto comerciales como de acceso libre, y también brinda la opción de incorporar datos propios del usuario. Esta plataforma se ha convertido en una referencia para expertos y aficionados en el ámbito de la teledetección, ya que proporciona una forma sencilla y efectiva de explorar y analizar datos satelitales (UNIGIS, 2020).

Algunas de las colecciones incluyen:

- Colecciones Sentinel
- Colecciones LANDSAT
- Modelos Digitales de Elevación (DEM)
- Colecciones ENVISAT
- Colecciones MODIS
- Servicios COPENICUS

La plataforma EO BROWSER también ofrece la posibilidad de descargar las imágenes satelitales en diversos formatos como GeoTiff, JP2 o KMZ; de esta forma, los archivos pueden ser trabajados por un software independiente y especializado (UNIGIS, 2020).

2.4.1 Sensor TROPOMI

El TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), localizado en el satélite Sentinel-5P, es una herramienta avanzada para la observación de la atmósfera. Se inspira en las capacidades de instrumentos anteriores como SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) y OMI (Ozone Monitoring Instrument), pero con una tecnología más avanzada, lo que le permite obtener mediciones más precisas y detalladas. Comparado con sus predecesores, TROPOMI ofrece mayor sensibilidad, mejor resolución tanto espectral como espacial, y una más rápida capacidad de recolección de datos. Esto lo posiciona como uno de los instrumentos más avanzados para estudiar la troposfera desde el espacio (TROPOMI, 2018).

2.4.2 Contaminantes atmosféricos registrados por el sensor TROPOMI

2.4.2.1 Monóxido de carbono (CO)

El dispositivo TROPOMI, monitorea la concentración mundial de CO, analizando las radiaciones terrestres en el segmento espectral de $2.3\mu\text{m}$ de la región infrarroja de onda corta (SWIR) del espectro lumínico. Las mediciones de TROPOMI en condiciones de cielo claro ofrecen datos sobre las columnas totales de CO, enfocándose en la capa límite de la troposfera. En condiciones de cielo nublado, la percepción de la columna se ajusta según el recorrido de la luz (TROPOMI, 2018).

2.4.2.2 Formaldehído (HCHO)

TROPOMI realiza el análisis de formaldehído a través de la espectroscopia de absorción diferencial (DOAS) en el rango ultravioleta-visible del espectro electromagnético. El formaldehído en la atmósfera absorbe la luz solar a longitudes de onda específicas. Cuando la luz solar atraviesa la atmósfera y se refleja hacia el espacio, la cantidad de luz absorbida por el formaldehído en ciertas longitudes de onda es registrada por TROPOMI. Al comparar el espectro de luz recibido con un espectro de referencia, es posible determinar la cantidad de formaldehído presente en la atmósfera. Este método permite a Sentinel-5P mapear las concentraciones de formaldehído en la atmósfera con una alta resolución espacial y temporal, proporcionando información valiosa sobre la calidad del aire y la presencia de este contaminante en particular (TROPOMI, 2018).

2.4.2.3 Metano (CH₄)

TROPOMI utiliza la espectroscopia para detectar la cantidad de luz que es absorbida por el CH₄ en longitudes de onda específicas, tanto en la banda de oxígeno (alrededor de 760nm), como en el rango espectral de infrarrojo de onda corta (SWIR). La habilidad de TROPOMI para monitorear el CH₄ con alta

sensibilidad cerca de la superficie de la Tierra es crucial para entender las fuentes y sumideros de este importante gas de efecto invernadero. La combinación de una buena cobertura espaciotemporal y una precisión adecuada hace que los datos de TROPOMI sean especialmente útiles para el modelado inverso, lo que puede ayudar a localizar y cuantificar las fuentes de emisión de metano.

Para garantizar la calidad y precisión de las mediciones de CH₄ de TROPOMI, es esencial comparar y validar estos datos con mediciones independientes. Por esta razón, los datos de otros instrumentos, como el GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) y los instrumentos terrestres TCCON (Total Carbon Column Observing Network), son esenciales. Estas comparaciones ayudan a ajustar y mejorar los algoritmos de procesamiento de datos de TROPOMI. Con las actualizaciones recientes, TROPOMI ha ampliado su capacidad para detectar metano, no solo sobre la tierra, sino también sobre áreas oceánicas donde se producen reflejos solares. Estos datos mejorados están disponibles en el flujo de datos OFFL (TROPOMI, 2018).

2.4.2.4 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El instrumento TROPOMI se fundamenta en avances algorítmicos derivados del producto DOMINO-2 y del conjunto reconfigurado EU QA4ECV NO₂ para OMI, y se ha ajustado específicamente para TROPOMI. Este enfoque de modelado y asimilación se apoya en el modelo tridimensional global de transporte químico TM5-MP, que tiene una resolución de 1x1 grado, siendo una pieza clave en el proceso (TROPOMI, 2018).

2.4.2.5 Dióxido de azufre (SO₂)

Ingresa a la atmósfera terrestre a través de procesos naturales y antropogénicos. Desempeña un papel en la química a escala local y global y su impacto va desde la contaminación a corto plazo hasta los efectos sobre el clima. Solo alrededor del 30% del SO₂ emitido proviene de fuentes naturales. TROPOMI toma muestras de la superficie de la Tierra con un tiempo de revisión de un día con una resolución espacial sin precedentes de 3,5 x 5,5 km que permite la resolución de detalles finos, incluida la detección de penachos de SO₂ mucho más pequeños (TROPOMI, 2018).

2.4.2.6 Ozono (O₃)

El ozono estratosférico protege la vida de la Tierra de la dañina radiación ultravioleta. Además, el ozono troposférico es un gas de efecto invernadero que afecta al clima. En la troposfera inferior, el ozono es un contaminante del aire que juega un papel importante en la química troposférica. El producto de datos de perfiles de ozono TROPOMI proporciona la concentración de ozono en 33 niveles en la atmósfera, con una resolución espacial de 28x28 km² en nadir. Además, el perfil se informa como 6 subcolumnas con un muestreo vertical de 6 km hasta una altitud de 24 km y un muestreo inferior por encima (24-32 km y 32 km hasta la parte

superior de la atmósfera o TOA). Los perfiles de ozono se derivan utilizando el método de estimación óptimo aplicado a la ventana espectral entre 270 y 330 μ m en la UV. El número de piezas independientes de información está en el rango de 4-6. Por lo tanto, los 33 niveles informados no son independientes y es muy importante utilizar los núcleos de promediación con los datos (TROPOMI, 2018).

2.4.2.7 Índice de aerosoles

El Aerosol Index (AI), es un índice cualitativo que indica la presencia de capas elevadas de aerosoles en la atmósfera. Se puede utilizar para detectar la presencia de aerosoles que absorben los rayos ultravioleta, como el polvo del desierto y las columnas de cenizas volcánicas. Este índice se calcula para dos pares de longitudes de onda: 340/380 nm y 354/388 nm (ESA, 2023).

3.- Marco Contextual

Este capítulo se centrará en aquellos aspectos físicos y socioeconómicos característicos de la República Mexicana, haciendo énfasis en aquellos que repercuten directamente en el comportamiento de la contaminación atmosférica.

Se cuenta con dos principales apartados: 3.1 Características fisiográficas de México, donde se habla, sobre todo, de aspectos como localización, división política, geomorfología, clima, etc. y 3.2 Características socioeconómicas de México, donde destacan conceptos como la dinámica poblacional y las principales actividades económicas en México.

Lo anterior, es punto de partida para comprender la situación actual del país, en materia de contaminación, ya que gran parte de las emisiones y distribución de contaminantes van en relación directa con los factores previamente mencionados.

3.1 Características fisiográficas de México

3.1.1 Localización

Geográficamente, la República Mexicana está localizada en el extremo meridional de América del Norte. Cuenta con una superficie de 1,964,375 km². Limita con Estados Unidos, Guatemala y Belice y tiene un total de 4,301 km distribuidos de la siguiente manera:

- La frontera de EE. UU. se extiende por 3,152 km desde el monumento 258 al noroeste de Tijuana, hasta la desembocadura del Río Grande en el Golfo de México. Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, son los estados limítrofes al norte del país.
- La frontera con Guatemala tiene una longitud de 956 km, con Belice 193 km y los estados limítrofes en el sur y sureste del país son: Chiapas, Tabasco, Campeche y Quintana Roo (Secretaría de Relaciones Exteriores, 2020).

Mapa 3.1 Localización y delimitación de la República Mexicana



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2020

3.1.2 División política

México es una nación democrática estructurada en entidades federativas. Aunque cada estado es libre, autónomo y soberano, no son interdependientes y funcionan según sus propias leyes. Sin embargo, deben actuar sin contradecir lo establecido en la constitución nacional de México. A pesar de su independencia, no tienen permiso para establecer alianzas con otros estados o naciones sin la aprobación federal. México está compuesto por 32 estados, que a su vez se subdividen en 2,469 municipios o alcaldías, constituyendo la estructura base del territorio (Proyectos México, 2022).

Mapa 3.1 División Política de la República Mexicana

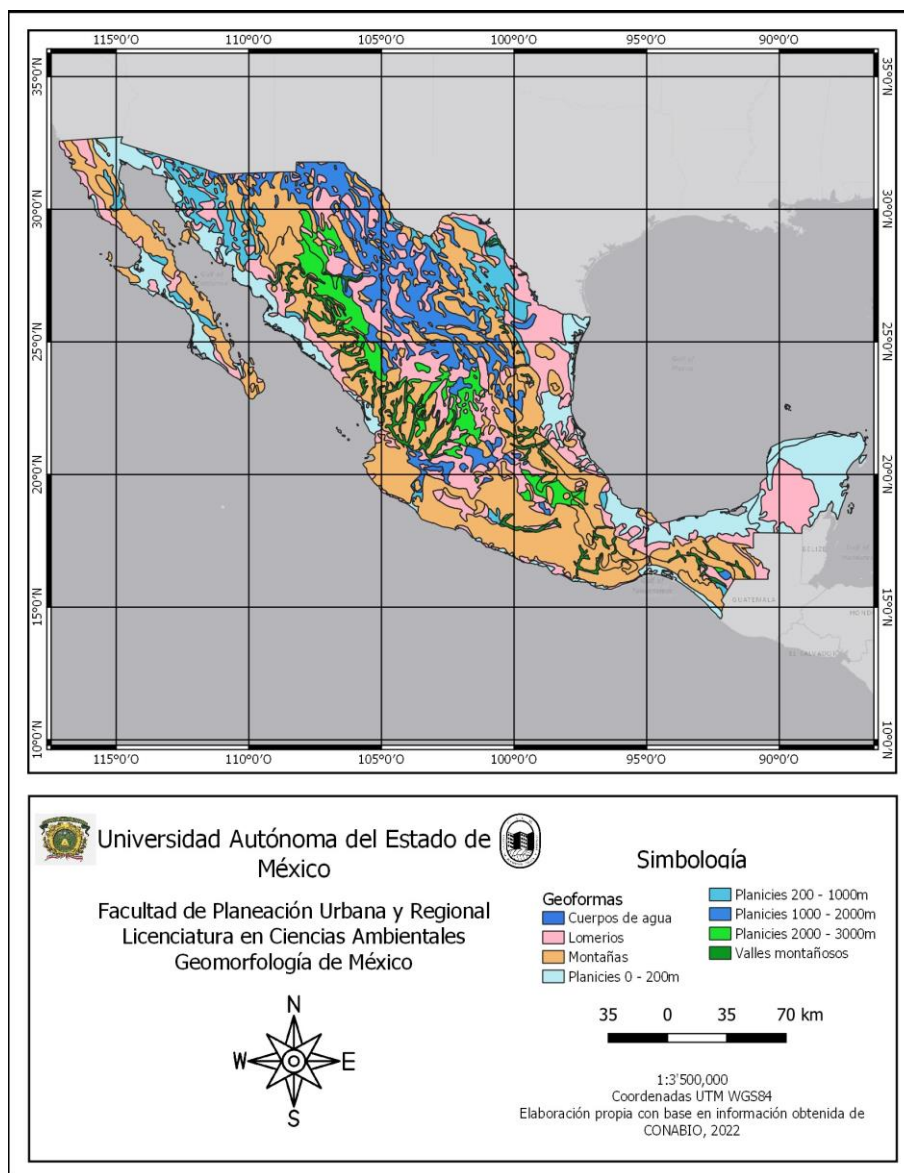


Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2020

3.1.3 Geomorfología y relieve

El país cuenta con un relieve que se sitúa entre placas terrestres y marinas, formado tanto por antiguas áreas cratónicas como por regiones recién formadas en puntos de subducción y transformación. Su estructura geológica abarca desde complejos metamórficos hasta sedimentos más recientes, que han evolucionado desde el Precámbrico. Geológicamente, el país se caracteriza por importantes cadenas montañosas como las Sierras Madres, altiplanos, el eje neovolcánico transversal y plataformas recientes, además de zonas costeras en el Golfo y el Pacífico. En términos de paisaje, las llanuras son las más predominantes, seguidas de montañas y colinas (Santana, y otros, 2017).

Mapa 3.3 Geomorfología y relieve de la República Mexicana



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2022

3.1.4 Clima

En México el clima está determinado por diversos factores, entre los que se encuentran la altitud, la latitud y la distribución existente de tierra y agua, por mencionar algunos. En el territorio nacional se identificaron 7 grandes tipos de clima. Destacan con mayor extensión los climas: cálido subhúmedo, seco y semiseco, seco desértico; con menor superficie los climas: cálido húmedo, templado subhúmedo, templado húmedo y frío con la mínima superficie (SEMARNAT, 2020).

3.1.4.1 Temperatura

México es un país muy diverso en términos de su geografía y clima, por lo que la temperatura media puede variar considerablemente según la región y la época del año. Sin embargo, en general, México cuenta con una variedad de climas que van desde tropical hasta desértico, pasando por templado y de alta montaña. En las zonas costeras y en las regiones bajas y cálidas, como la costa del Golfo de México y la costa del Pacífico, las temperaturas medias anuales suelen oscilar entre los 25°C y los 30°C. En las zonas montañosas y de mayor altitud, como la Ciudad de México y las áreas cercanas, las temperaturas medias anuales son más moderadas, alrededor de los 15°C a 20°C. En las regiones desérticas del norte de México, como el estado de Sonora y partes de Baja California, las temperaturas medias pueden superar los 35°C durante los meses más calurosos. Es importante tener en cuenta que estas son estimaciones generales y que las temperaturas pueden variar según la ubicación exacta, la altitud y la temporada del año (Ortíz Solorio & Gutiérrez Castorena, 2007).

3.1.4.2 Humedad relativa

La humedad relativa en México varía considerablemente según la región geográfica y la época del año. Al ser un país diverso con una gran extensión territorial, las condiciones climáticas y la humedad pueden variar significativamente de una región a otra. En las zonas costeras y tropicales, como la costa del Golfo de México, la costa del Pacífico y la Península de Yucatán, la humedad relativa tiende a ser alta, generalmente superando el 70% durante gran parte del año. Estas áreas suelen tener un clima húmedo y cálido. En las zonas montañosas y de mayor altitud, como la Ciudad de México y las áreas cercanas, la humedad relativa puede variar dependiendo de la temporada. Durante la temporada de lluvias, que generalmente ocurre de mayo a octubre, la humedad puede ser alta, mientras que, durante la temporada seca, la humedad puede disminuir. En las regiones desérticas del norte de México, como el estado de Sonora y partes de Baja California, la humedad relativa tiende a ser baja debido al clima árido y seco, con valores que a menudo caen por debajo del 30% o incluso más bajos (DatosMundial, 2023).

3.1.4.3 Viento

México cuenta con una gran diversidad de paisajes y climas, lo que influye en los patrones de viento en diferentes regiones del país. En las zonas costeras, especialmente en las áreas cercanas al Golfo de México y el océano Pacífico, es común encontrar vientos provenientes del mar. Estos vientos costeros, conocidos como brisas marinas, ocurren debido a las diferencias de temperatura entre el agua y la tierra. Durante el día, el aire caliente sobre la tierra asciende, y el aire más fresco y húmedo del mar se mueve hacia la costa, creando brisas marinas que a menudo son más fuertes en la tarde. En las zonas montañosas y de mayor altitud, como la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, así como en el altiplano central donde se encuentra la Ciudad de México, los vientos pueden ser más variables. La topografía montañosa y los valles pueden generar vientos locales, como los vientos de montaña y valle, que son influenciados por la diferencia de temperatura y presión en áreas específicas. En las regiones desérticas del norte de México, como Sonora y partes de Baja California, es común encontrar vientos secos y fuertes. Estos vientos, conocidos como vientos de Santa Ana o vientos del norte, se originan en las áreas de alta presión y pueden soplar con fuerza, especialmente durante el invierno, causando condiciones secas y aumentando el riesgo de incendios forestales.

En la costa del Golfo de México, el viento suele circular desde el sureste hacia el noroeste. Esta dirección del viento es común durante gran parte del año y se debe a los sistemas de alta presión ubicados en el Golfo de México. En la costa del Pacífico, el viento tiende a soplar desde el oeste hacia el este, especialmente durante los meses de verano. Esta dirección del viento se conoce como viento del oeste y está asociada con los sistemas de alta presión en el océano Pacífico. En las zonas montañosas y de mayor altitud, como la Ciudad de México y las áreas cercanas, la dirección del viento puede variar debido a la topografía y la influencia local. Los vientos pueden ser influenciados por la configuración de los valles y las montañas, lo que puede generar vientos locales y direcciones variables. En las regiones desérticas del norte de México, los vientos suelen soplar desde el norte hacia el sur. Estos vientos del norte, conocidos como vientos de Santa Ana, son más frecuentes durante el invierno y pueden ser fuertes y secos.

En las zonas costeras y tropicales, como la costa del Golfo de México y la costa del Pacífico, las velocidades del viento suelen ser moderadas, con promedios entre 10 y 20 kilómetros por hora. Sin embargo, durante eventos climáticos como tormentas tropicales o huracanes, las velocidades del viento pueden aumentar significativamente. En las regiones montañosas y de mayor altitud, como la Ciudad de México y las áreas cercanas, las velocidades del viento pueden variar considerablemente debido a la topografía y la influencia local. Las velocidades promedio suelen estar en el rango de 5 a 15 kilómetros por hora, pero en áreas expuestas y en altitudes más altas, las velocidades del viento pueden aumentar.

En las regiones desérticas del norte de México, como Sonora y partes de Baja California, las velocidades del viento pueden ser más altas. Durante los eventos de vientos de Santa Ana, las velocidades pueden superar los 40 kilómetros por hora y, en casos extremos, alcanzar incluso velocidades superiores a los 100 kilómetros por hora. (SMN, 2023)

3.1.4.4 Presión atmosférica

La presión atmosférica promedio a nivel del mar es de 1013.25 hPa o 1013.25 mbar, que es un estándar global. Sin embargo, la presión atmosférica varía dependiendo de la altitud. Dado que México tiene una topografía diversa, con zonas costeras, llanuras, valles y altas montañas, la presión atmosférica varía en diferentes partes del país. Por ejemplo, en la Ciudad de México, que se encuentra a una altitud de aproximadamente 2,250 metros sobre el nivel del mar, la presión atmosférica es notablemente menor que la presión estándar a nivel del mar y suele rondar alrededor de 780 hPa (AEMeT, 2022).

3.1.4.5 Precipitación

México tiene una gran diversidad climática, lo que significa que la precipitación puede variar significativamente de una región a otra. En términos generales, la precipitación promedio anual en México es de aproximadamente 800 milímetros, pero este valor puede variar:

- En la región del sureste, como en estados como Tabasco y Chiapas, la precipitación puede exceder los 2,000 milímetros anuales debido a las condiciones tropicales húmedas.
- En la península de Yucatán, la precipitación puede variar entre 700 y 1,100 milímetros al año.
- En el norte del país, en estados como Sonora y Baja California, la precipitación es mucho más baja, con valores que pueden ser inferiores a los 300 milímetros al año en las áreas más áridas.
- La Ciudad de México, ubicada en un valle en el centro del país, tiene una precipitación promedio de alrededor de 700 a 800 milímetros al año. (AEMeT, 2022)

3.1.4.2 Nubosidad

La nubosidad en México varía significativamente de acuerdo con la región y la temporada del año. Un resumen general de la nubosidad en diferentes zonas y temporadas se puede encontrar como:

- Estación de lluvias (mayo a octubre): Durante este período, gran parte del país experimenta un aumento en la nubosidad, especialmente en las tardes cuando son comunes las tormentas y lluvias convectivas.
- Estación seca (noviembre a abril): La nubosidad tiende a ser menor durante estos meses, especialmente en el norte y centro del país. Las mañanas

suelen ser despejadas, y ocasionalmente se forman algunas nubes en la tarde.

- **Región del Sureste:** Esta región, que incluye estados como Tabasco, Chiapas y la Península de Yucatán, tiende a tener una mayor nubosidad durante todo el año debido a su clima húmedo tropical.
- **Región Norte:** Los estados del norte, como Sonora, Chihuahua y Baja California, suelen tener menor nubosidad, especialmente durante la estación seca. Sin embargo, durante el verano, el Monzón de Norteamérica puede llevar a un aumento en la nubosidad y las precipitaciones en algunas de estas áreas.
- **Zona Costera:** Tanto la costa del Pacífico como la del Golfo de México pueden experimentar nubosidad, especialmente en la estación de lluvias. La formación de ciclones tropicales en estas regiones también puede aumentar la nubosidad (AEMeT, 2022).
- **Zonas montañosas:** Las áreas de mayor altitud, como la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y el Eje Volcánico Transversal, suelen tener más nubosidad debido al ascenso orográfico de masas de aire húmedo que se condensan y forman nubes.

3.2 Características socioeconómicas de México

3.2.1 Dinámica Poblacional

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, de los casi 125 millones de habitantes que hay en el país, 61.12 millones son hombres y 63.86 millones son mujeres; destaca además que el 76.9% del total (96.06 millones de personas), vive en ámbitos urbanos, mientras que el 23.1% (28.92 millones), vive en localidades rurales (México Social, 2019).

Mapa 3.4 Densidad poblacional en la República Mexicana



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2020

3.2.2 Actividades económicas en México

- **Agricultura:** es el cultivo de diferentes plantas, semillas y frutos, para proveer de alimentos al ser humano o al ganado y de materias primas a la industria. En 2019, los principales productos agroalimentarios que más exportó México fueron aguacate, jitomate, nuez, pepino, limón, espárrago y mango.
- **Ganadería:** es una actividad del sector primario que consiste en el cuidado y alimentación de cerdos, vacas, pollos, borregos, abejas, entre otros animales, para aprovechar su carne, leche, huevos, lana, miel y otros derivados para consumo humano. En 2019, hay 34,037,141 cabezas de ganado bovino de las cuales el 45.3% son vacas para cría de becerros o producción de leche. Para el ganado porcino, en 2019, se estimaron 14 millones de cabezas en México, de las cuales el 66.8% están en desarrollo o engorda. A nivel nacional, en 2019 la producción de aves de corral fue de 423 millones de cabezas, de las cuales 45.8% son pollos y pollas en crecimiento (INEGI, Ganadería, 2019).
- **Minería:** es una actividad económica encargada de la extracción, explotación y aprovechamiento de los minerales. En 2018, hay 3,123 establecimientos dedicados a la minería en México. Sus actividades son muy variadas, por ejemplo, extracción de petróleo y gas; explotación de minerales metálicos y no metálicos en minas, canteras y bancos de materiales; así como operaciones en pozos, entre otras (INEGI, 2019).
- **Comercio:** en 2018, hay 2,248,315 establecimientos dedicados al comercio en México. Sus actividades son muy variadas, compran y venden abarrotes, alimentos, bebidas, hielo y tabaco, ropa, zapatos, productos farmacéuticos, de perfumería, artículos para el esparcimiento, electrodomésticos menores y aparatos de línea blanca, computadoras y automóviles, entre otros (INEGI, 2019).
- **Construcción:** este sector es muy importante en el desarrollo de un país, ya que proporciona elementos de bienestar básicos en una sociedad al construir escuelas y hospitales, entre otros. Esta actividad económica utiliza insumos provenientes de otras industrias, como: el acero, hierro, cemento, arena, cal, madera y aluminio; por este motivo, es uno de los principales motores de la economía del país. En 2018, hay 19,501 empresas dedicadas a la construcción en México (INEGI, 2019).

4.- Marco Normativo

El presente capítulo, tiene por objetivo, realizar una revisión de las principales leyes y normas aplicadas a la calidad del aire. El contenido se engloba en dos principales apartados: 4.1 Normatividad internacional y 4.2 Normatividad nacional.

En el primer apartado, se revisan las guías de calidad del aire, propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), donde se especifican límites máximos permisibles para los diversos contaminantes criterio.

En la información publicada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), se especifican también, los límites máximos permisibles para cada contaminante criterio.

Respecto a la normatividad nacional, podemos ubicar cuatro principales rubros normativos para la calidad del aire: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), Normas Oficiales Mexicanas (NOMs), Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y el Índice AIRE Y SALUD.

4.1 Normatividad Internacional

4.1.1 Guías de calidad del aire de la OMS

Las directrices sobre la calidad del aire de la OMS se crearon para apoyar acciones que buscan un aire más limpio que garantice la salud de la población en diferentes contextos. Estas directrices se fundamentan en la evidencia científica sobre la polución atmosférica y sus efectos en la salud humana. Es esencial medir los niveles de contaminantes en áreas bajo monitoreo que reflejen la exposición real de la gente. En zonas cercanas a fuentes específicas de polución, como vías principales, plantas eléctricas o grandes emisores estacionarios, las concentraciones pueden ser superiores, lo que podría necesitar acciones adicionales para asegurar que los niveles estén bajo los estándares recomendados (OMS, 2021).

Los límites máximos permisibles para PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ y O₃, se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Límites máximos permisibles para contaminantes criterio OMS

Contaminante	Límite máximo permisible
Material particulado PM _{2.5}	10 µg/m ³ , media anual 25 µg/m ³ , media de 24 horas
Material particulado PM ₁₀	20 µg/m ³ , media anual 50 µg/m ³ , media de 24 horas
Ozono (O ₃)	100 µg/m ³ , media de ocho horas
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	40 µg/m ³ , media anual 200 µg/m ³ , media de una hora
Dióxido de azufre (SO ₂)	20 µg/m ³ , media anual 500 µg/m ³ , media de una hora

Fuente: Elaboración propia con base en (OMS, 2021)

4.1.2 Agencia de Protección Ambiental (EPA)

Los valores específicos relacionados con la calidad del aire son criterios usados para evaluar si una región cumple con los estándares nacionales establecidos para cada contaminante medido, complementados con detalles sobre las estaciones de monitoreo. Estos estándares se establecen para salvaguardar la salud de quienes pasan tiempo al aire libre, ya sea trabajando o realizando actividades recreativas. Para la mayoría de los contaminantes, hay un estándar que se refiere a la exposición a corto plazo y otro para la exposición a largo plazo. Las mediciones de las concentraciones de contaminantes se promedian según los períodos definidos por los estándares y luego se contrastan con los límites establecidos en dichos estándares (EPA, 2021).

Los límites máximos permisibles para PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ y CO se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Límites máximos permisibles para contaminantes criterio EPA

Contaminante	Límite máximo permisible
Material particulado PM _{2.5}	No se especifica
Material particulado PM ₁₀	50 µg/m ³ , media anual 150 µg/m ³ , media de 24 horas
Ozono (O ₃)	0.11 ppm, media de una hora
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	21 ppm, media de una hora
Dióxido de azufre (SO ₂)	0.030 ppm, media anual 0.13 ppm, media de 24 horas
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm, media de 8 horas

Fuente: Elaboración propia con base en (EPA, 2021)

4.2 Normatividad nacional

4.2.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

La LGEEPA abarca cinco títulos en materia ambiental, siendo el segundo capítulo, el mismo que aborda los temas de contaminación atmosférica (LGEEPA, 2012). Los artículos comprendidos en el capítulo II, “Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera”, son del 110 al 116.

4.2.2 NOM-020-SSA1-2020(DOF, 2020)

Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-020-SSA1-2020, Salud ambiental. Que establece los criterios para evaluar la calidad del aire, con respecto al ozono (O_3). Valores normados para la concentración de ozono (O_3) en el ambiente, como medida de protección a la salud de la población. (SEGOB, 2020)

Especificaciones:

- “Se especificó como valor límite máximo de concentración de 8 horas de $137\mu g/m^3$, a condiciones de referencia $25^\circ C$ y 1 atm de presión (0.070 ppm), el cual es mayor al valor guía de calidad del aire $100\mu g/m^3$ (0.051 ppm) recomendado por la Organización Mundial de la Salud”.
- “En cada sitio de monitoreo, las concentraciones horarias se reportarán en ppm a condiciones locales, con 3 cifras decimales significativas. Si se cuenta con valores de 4 o más cifras decimales, el valor será redondeado de la siguiente manera: si el cuarto decimal es un número entre 0 y 4, la tercera cifra decimal no se incrementará; si el valor decimal es un número entre 5 y 9, la tercera cifra decimal se incrementará al número inmediato superior”.

4.2.3 NOM-022-SSA1-2019 (DOF, 2019)

Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Que establece los criterios para evaluar la calidad del aire, con respecto al dióxido de azufre (SO_2). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el ambiente, como medida de protección a la salud de la población. (SEGOB, 2019)

Especificaciones:

- “Se especificó como límite máximo de la concentración promedio de 24 horas 0.110 partes por millón ($288\mu g/m^3$), que era casi 14 veces el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud, 2.75 veces el de California y 2.29 veces el de la Unión Europea.

- *En cada sitio de monitoreo, las concentraciones horarias se reportarán en ppm con 3 cifras decimales significativas. Si se cuenta con valores de 4 o más cifras decimales, el valor será redondeado de la siguiente manera: si el cuarto decimal es un número entre 5 y 9, el valor del tercer decimal se incrementará al inmediato superior; si el valor del cuarto decimal es 4 o menor, el valor del tercer decimal no se incrementa”.*

4.2.4 NOM-023-SSA1-2021(DOF, 2021)

Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental. Que establece los criterios para evaluar la calidad del aire con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire como medida de protección a la salud de la población. (SEGOB, NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021, 2021)

Especificaciones:

- *“La concentración de bióxido de nitrógeno, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm o lo que es equivalente a 395 µg/m³, en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible”.*

4.2.5 NOM-021-SSA1-2021(DOF, 2021)

Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021, Salud Ambiental. Que establece los criterios para evaluar la calidad del aire con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono en el ambiente, como medida de protección a la salud de la población. (SEGOB, 2021)

Especificaciones:

- *“El monóxido de carbono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm (12595 µg/m³), en promedio móvil de ocho horas una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible”.*

4.2.6 IMECA

El IMECA es un sistema que indica la calidad del aire en áreas metropolitanas, reflejando el grado de contaminación y sus posibles efectos en la salud humana. Basado en la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006 desde 2006, este índice se aplica a cinco contaminantes principales: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas en suspensión. Su escala va de 0 a 500, estableciendo 100 como el límite recomendado según las Normas Oficiales Mexicanas para cada contaminante. Un IMECA por debajo de 100 se ve como aceptable y con mínimos riesgos para la salud, mientras que valores

superiores sugieren incremento en la contaminación y el riesgo para la salud pública (CDMX, 2021).

El índice de calidad del aire se reporta cada hora los 365 días del año, para cada una de las 29 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire en la CDMX y la zona conurbada (CDMX, 2021).

4.2.6 Índice AIRE Y SALUD

El Índice AIRE Y SALUD vincula la cantidad de determinados contaminantes en el aire a una clasificación específica de calidad del aire, proporcionando un nivel de riesgo y recomendaciones para proteger tanto a la población en general como a los grupos más vulnerables. Es relevante señalar que este índice no toma en cuenta las últimas actualizaciones de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de 2019 y 2021, por lo que sus parámetros de la categoría "Aceptable" aún se basan en las especificaciones previas de las NOM (NOM-020-SSA1-2014, NOM-021-SSA1-1993, NOM-022-SSA1-2010, NOM-023-SSA1-1993 y NOM-025-SSA1-2014).

El Índice AIRE Y SALUD evalúa la calidad del aire mediante distintas métricas, como el promedio móvil de 8 horas y el modelo de predicciones NowCast, centrándose en seis contaminantes principales: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, y las partículas PM₁₀ y PM_{2.5}. Según las concentraciones detectadas, se categoriza la calidad del aire en cinco colores distintos: verde, amarillo, naranja, rojo y morado, representando cada uno un grado de riesgo para la salud. Es relevante señalar que el Índice AIRE Y SALUD no se correlaciona directamente con los sistemas previos de medición de calidad del aire. En la capital mexicana, las actualizaciones de este índice son cada hora, basándose en los datos de las 29 estaciones automáticas de monitoreo atmosférico (SEDEMA, 2023).

5.- Resultados y Observaciones

En este apartado se abordan los resultados obtenidos en la presente investigación, los cuales se muestran de acuerdo a la temporalidad designada en el esquema de investigación: 05 de febrero de 2019 y 2020; 05 de mayo de 2019 y 2020; 05 de agosto de 2019 y 2020; 05 de noviembre de 2020 y 2021; en horarios que van desde las 16:00 a las 18:00 h. Es importante aclarar que, estas fechas corresponden al punto medio de cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno). Las imágenes satelitales para cada uno de los contaminantes fueron captadas por el satélite Sentinel-5 Precursor (5P) y obtenidas del portal web EO BROWSER, posteriormente, fueron cargadas al software QGIS, ajustando los valores de acuerdo a las unidades de medición correspondientes, se le aplicó una paleta de colores para identificar los niveles de concentración en las distintas zonas del país y finalmente se le dio un formato de “mapa” para mejorar su presentación.

En cada uno de los periodos designados, se muestran los mapas correspondientes a los siguientes contaminantes: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂). Los mapas, muestran los niveles de concentración y la distribución de dichos contaminantes en la República Mexicana, además se cuenta con simbología temática para facilitar la identificación.

La concentración y distribución de contaminantes se relacionó con 3 factores que podrían influir en su comportamiento: la velocidad del viento, la composición orográfica del país y la distribución de ciudades. Las imágenes de velocidad del viento fueron obtenidas del programa GIOVANNI, un sitio diseñado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) que proporciona imágenes satelitales de diversos factores atmosféricos. Dichas imágenes también fueron seleccionadas de acuerdo a la temporalidad designada, aunque, para este caso, fue necesaria una mayor precisión en cuanto a los días y horas en que se capturaron las imágenes de los contaminantes; lo anterior con el fin de hacer una relación más adecuada entre ambos factores.

En lo que respecta a la hipsometría, se obtuvo un archivo vectorial en formato SHP (SHAPEFILE) de las bases de datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) de hipsometría en la República Mexicana. Dicho archivo fue procesado en QGIS y convertido en cartografía temática.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las temporalidades designadas.

5.1 Primavera 2019

Respecto a la información obtenida para la primavera 2019, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen factores que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso de la primavera 2019, el día tomado como referencia es el 05 de mayo, en un horario de entre las 16:00 y las 18:00 h para todos los contaminantes y factores. Es apreciable que, en todos los casos, las zonas más afectadas del país son las zonas norte, noreste y oriente. Para el resto del país, existen concentraciones, aunque en menor cantidad.

5.1.1 Monóxido de carbono (CO):

Tomando como referencia el mapa 5.1, encontramos que, durante la primavera 2019 se observan niveles de monóxido de carbono que se mantienen uniformes en la República y no sobrepasan los 0.02 mol/m^2 . La presencia de nubes para el día 05 de mayo, es apreciable principalmente en las zonas norte y occidente del país, limitando la visibilidad de posibles concentraciones que sean más elevadas.

5.1.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2):

Durante el mismo periodo, el dióxido de nitrógeno es apreciable en el mapa 5.2 en concentraciones que van desde los 3.5E^{-5} hasta los $8.75\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, esto en las regiones norte, noreste y oriente, alcanzando estados como Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Morelos, Puebla, Oaxaca y Veracruz. Asimismo, es apreciable la presencia de NO_2 en el resto del país, sin embargo, las concentraciones se mantienen entre los 0.01 y los $3.4\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, algunas llegando incluso, al Golfo de México y al Océano Pacífico.

5.1.3 Dióxido de azufre (SO_2):

La información presentada para el dióxido de azufre contenida en el mapa 5.3, revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.3\text{E}^{-3} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana, sin embargo, la presencia de nubes imposibilita un análisis en las zonas centro y noreste.

En relación con la velocidad del viento y de acuerdo al mapa 5.4, las velocidades más altas, las encontramos en las regiones norte, noroeste y noreste del país, alcanzando los 8.539 m/s, mientras que, aquellas con velocidades más bajas, corresponden a las regiones occidente, oriente y suroeste, ubicándose entre los 0.877 y los 2.793 m/s. Es apreciable una relación significativa entre aquellas zonas donde el viento alcanza velocidades más altas en comparación con la presencia de dióxido de nitrógeno, principalmente en las regiones norte y noreste.

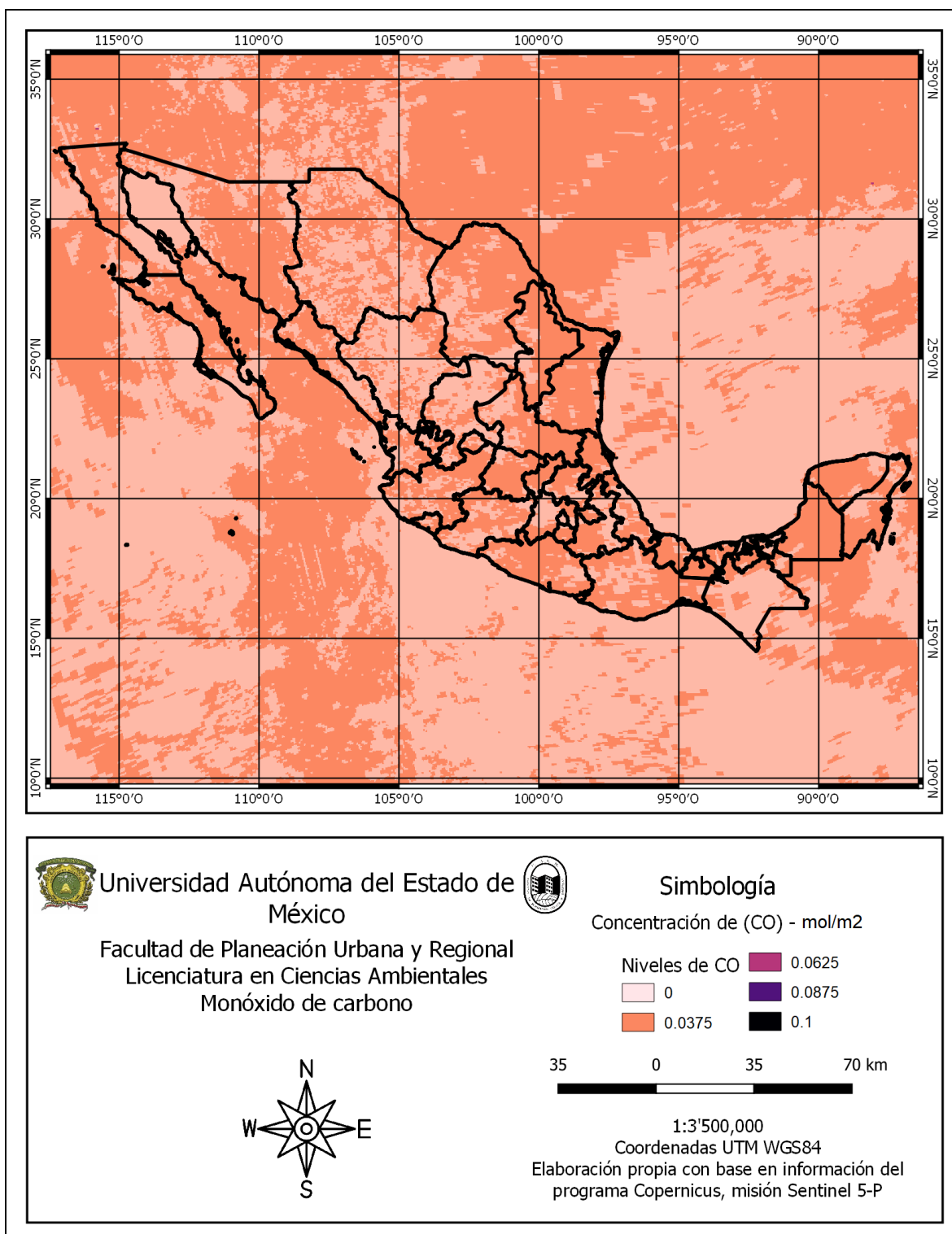
De acuerdo con el mapa 5.5, la hipsometría en México no representa un factor determinante en la presencia de contaminantes, esto podemos apreciarlo principalmente en la región orográfica conocida como Sierra Madre Occidental, donde las concentraciones de contaminantes son significativas.

En cuanto a la distribución de ciudades, parece que existe cierta relación en cuanto a la concentración de contaminantes, principalmente en la zona centro, tal como lo muestra el mapa 5.6.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

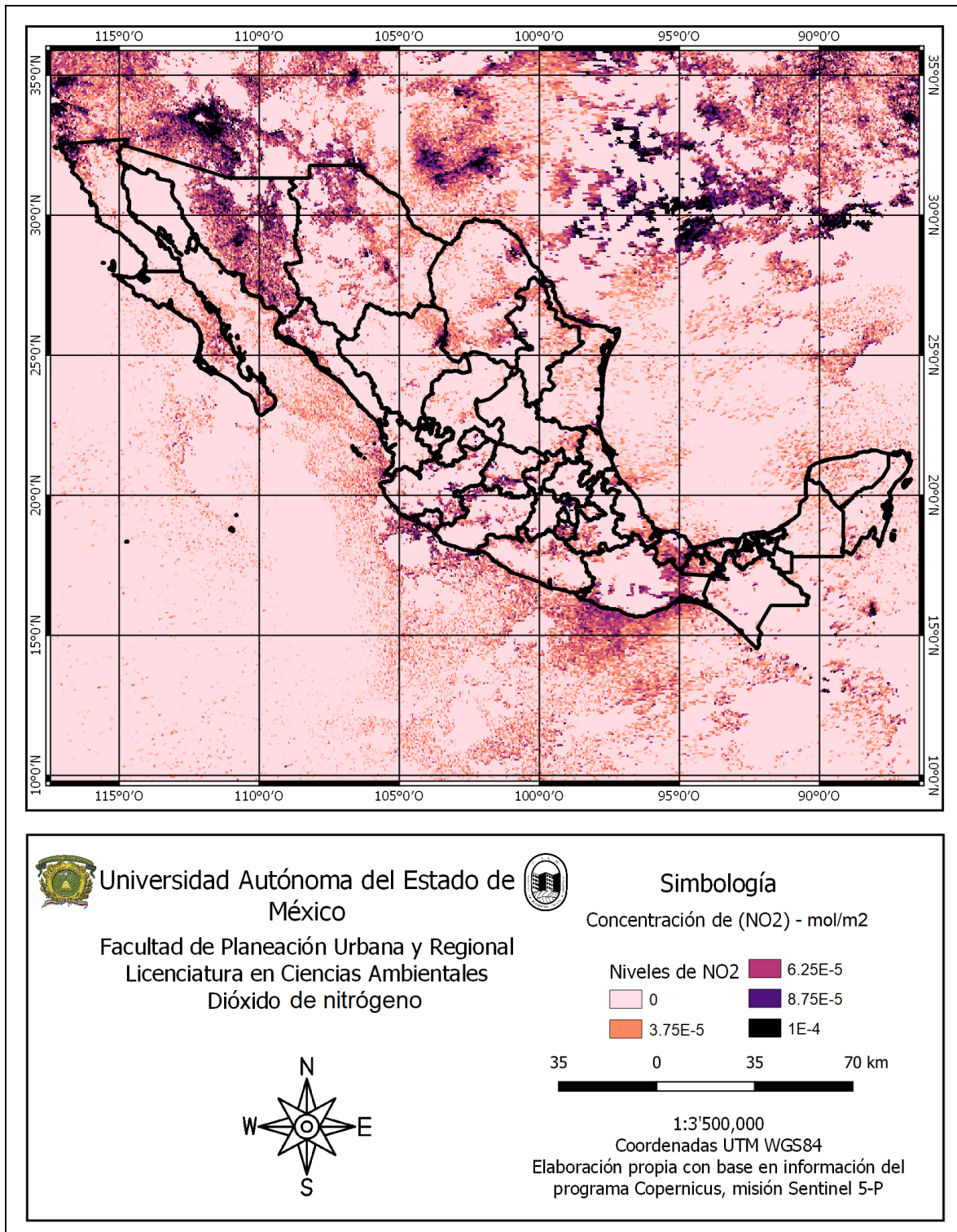
Nº de mapa	Descripción
5.1	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.2	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.3	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.4	Velocidad del viento
5.5	Hipsometría de México
5.6	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.1 Concentración de monóxido de carbono (CO), primavera 2019.



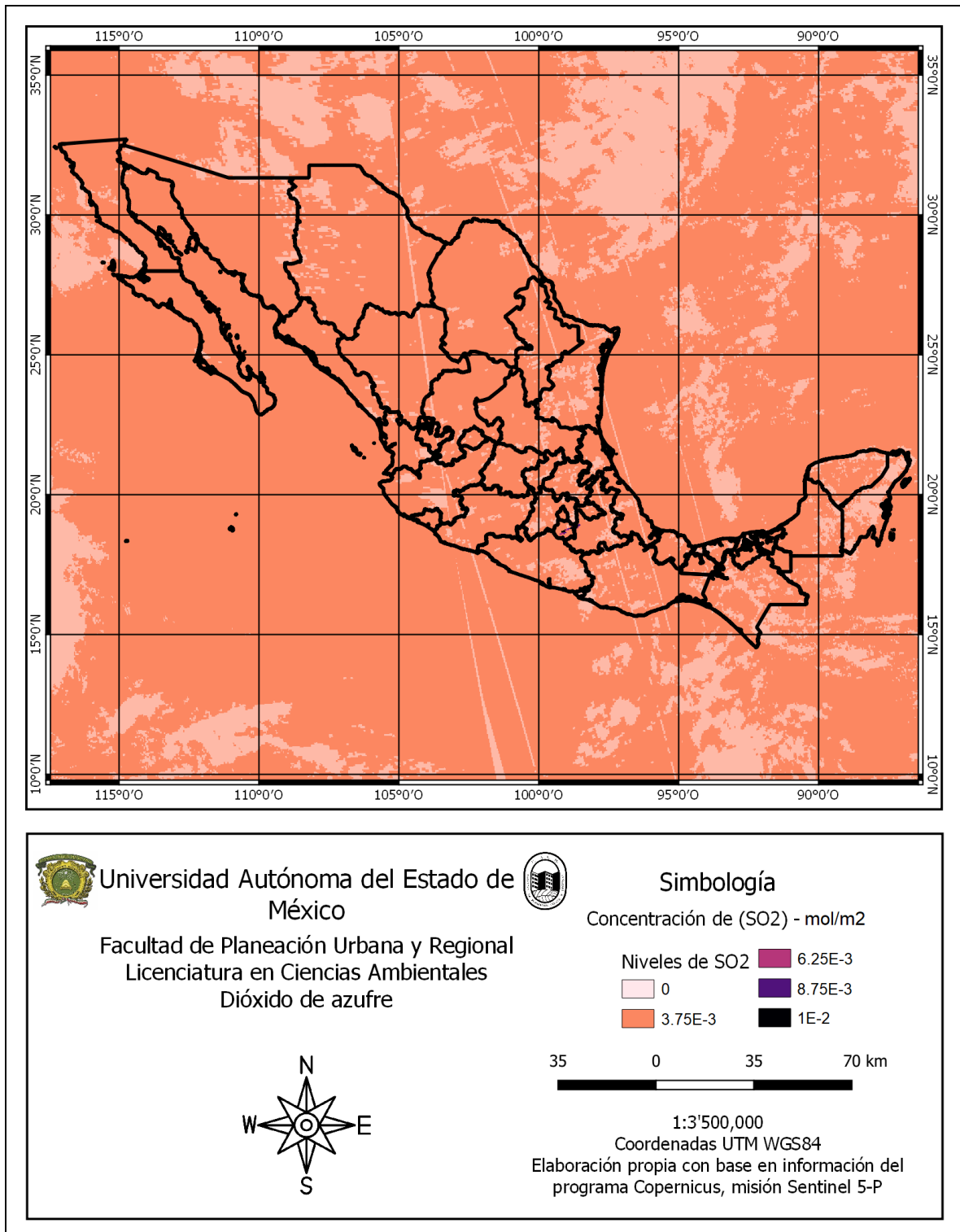
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.2 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), primavera 2019.



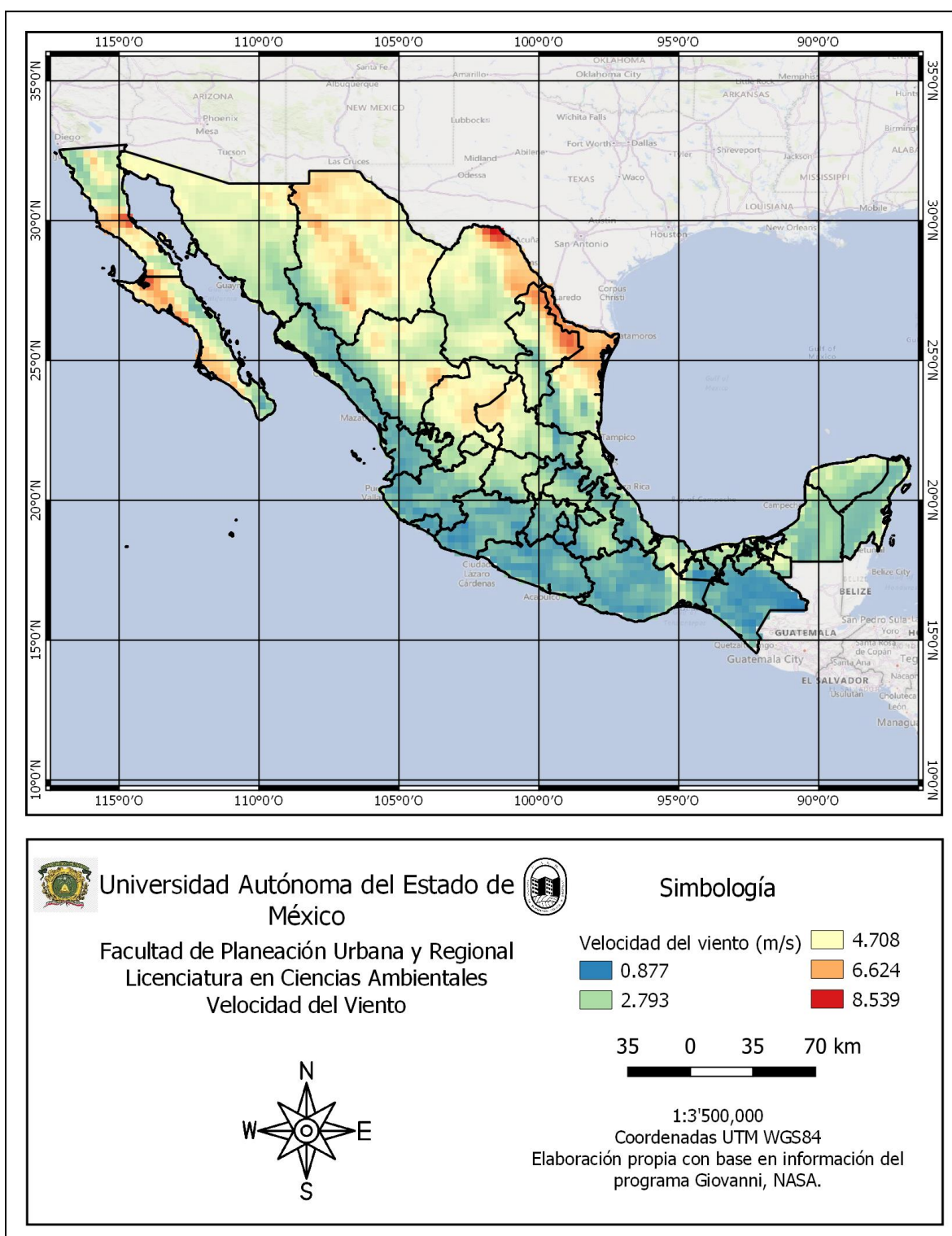
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.3 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), primavera 2019.



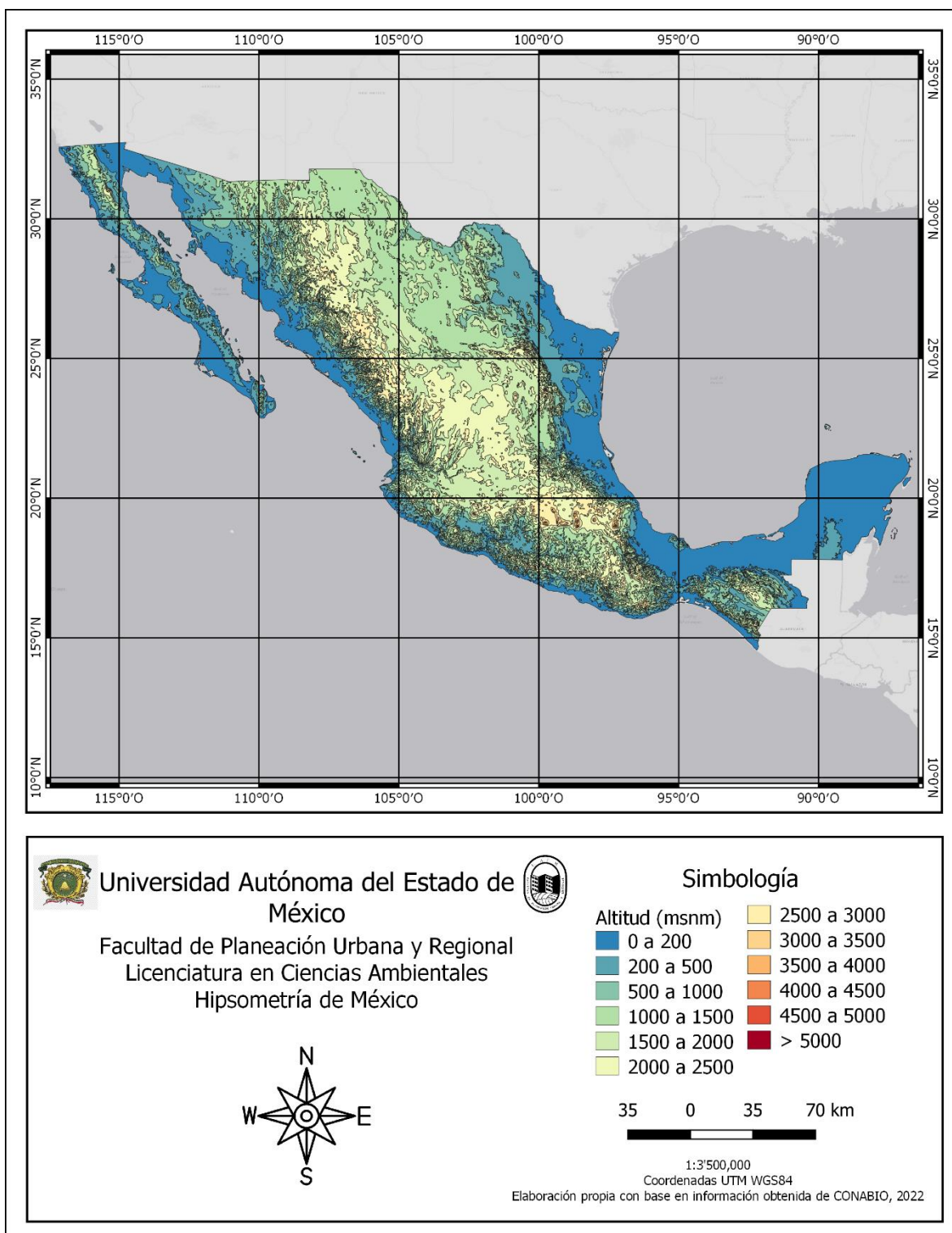
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.4 Velocidad del viento en m/s, primavera 2019.



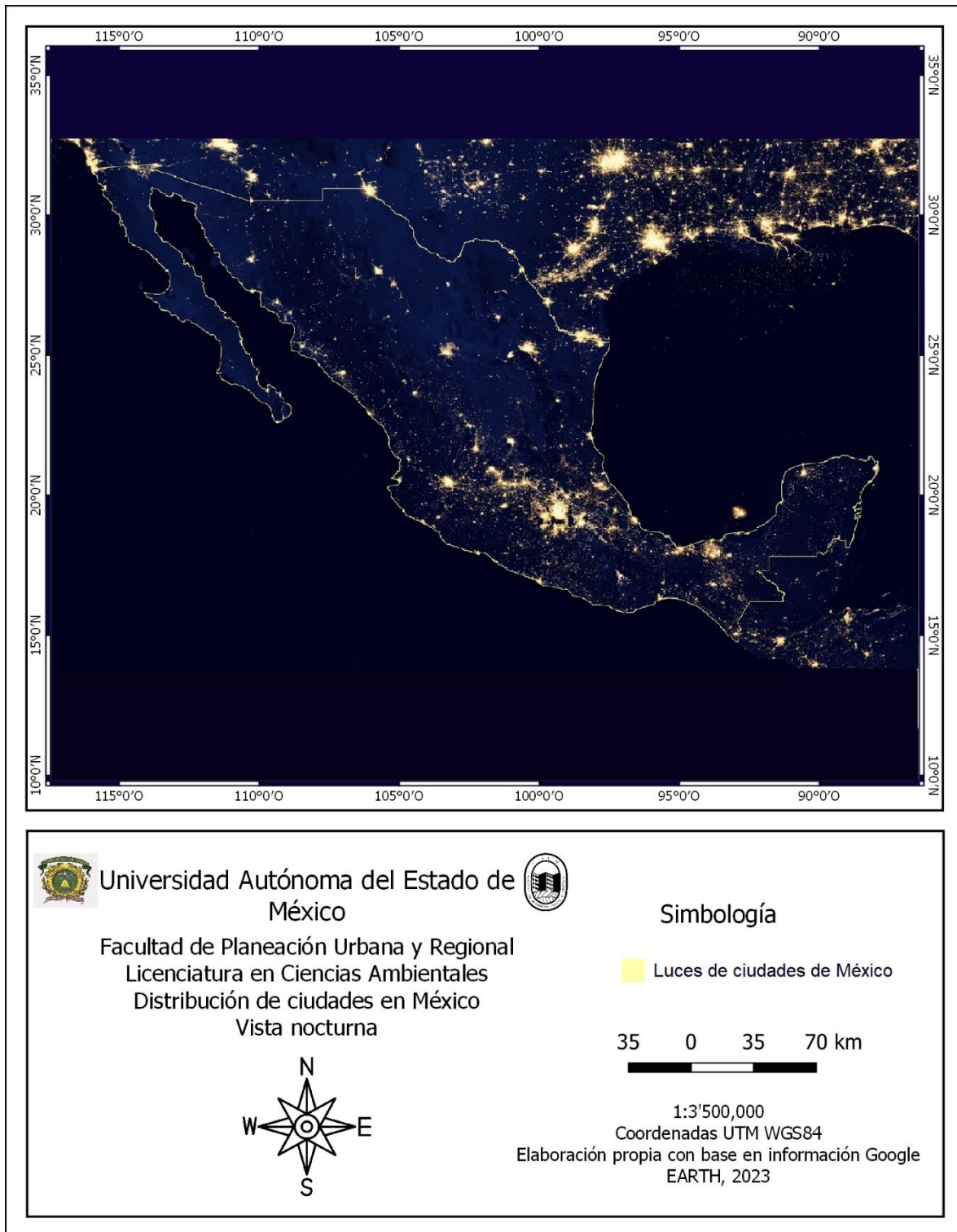
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.5 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.6 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.2 Primavera 2020

Respecto a la información obtenida para la primavera 2020, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen variables que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso de la primavera 2020, el día tomado como referencia es el 05 de mayo, en un horario de 16:00 a 18:00 h para todos los contaminantes y variables. Es apreciable que, en todos los casos, las zonas más afectadas del país son la zona noroeste, noreste y parte de la zona centro.

5.2.1 Monóxido de carbono (CO):

Durante la primavera 2020 y de acuerdo con el mapa 5.7, se observan niveles uniformes de monóxido de carbono a lo largo de la república, donde las concentraciones no superan los 0.02 mol/m^2 , sin embargo, hay que destacar que, la presencia de nubes afecta la visibilidad en determinados puntos del país, principalmente en la zona norte, centro y sureste.

5.2.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2):

En lo relativo al dióxido de nitrógeno y tomando como referencia el mapa 5.8, las concentraciones máximas se registran en las zonas noroeste y centro, en estados como Baja California, Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Morelos y Puebla. Los niveles máximos registrados para dichos estados, rondan los 6E^{-5} y los $1\text{E}^{-4} \text{ mol/m}^2$, mientras que la mínima apreciable va desde los 1.25E^{-5} hasta los $3.75\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$. En la zona sur del país, son apreciables ligeras concentraciones que se encuentran alrededor de los $4\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$. El área restante del país no supera valores de $2.5\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$.

5.2.3 Dióxido de azufre (SO_2):

La información presentada para el dióxido de azufre revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.3\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana. La nubosidad es apreciable en diversos puntos como la zona noreste y centro, tal como lo muestra el mapa 5.9

Para la velocidad del viento y de acuerdo al mapa 5.10, las velocidades máximas alcanzadas son equivalentes a los 6.917 m/s , en estados como Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, sin embargo, la mayor parte de la zona noreste y noroeste no baja de los 3.952 m/s . Lo anterior, es un punto importante a considerar, principalmente en estados como Sonora, Chihuahua y Coahuila.

La hipsometría en el país no refleja una relación directa durante esta temporalidad, ya que en el mapa 5.11 podemos apreciar niveles significativos de contaminantes

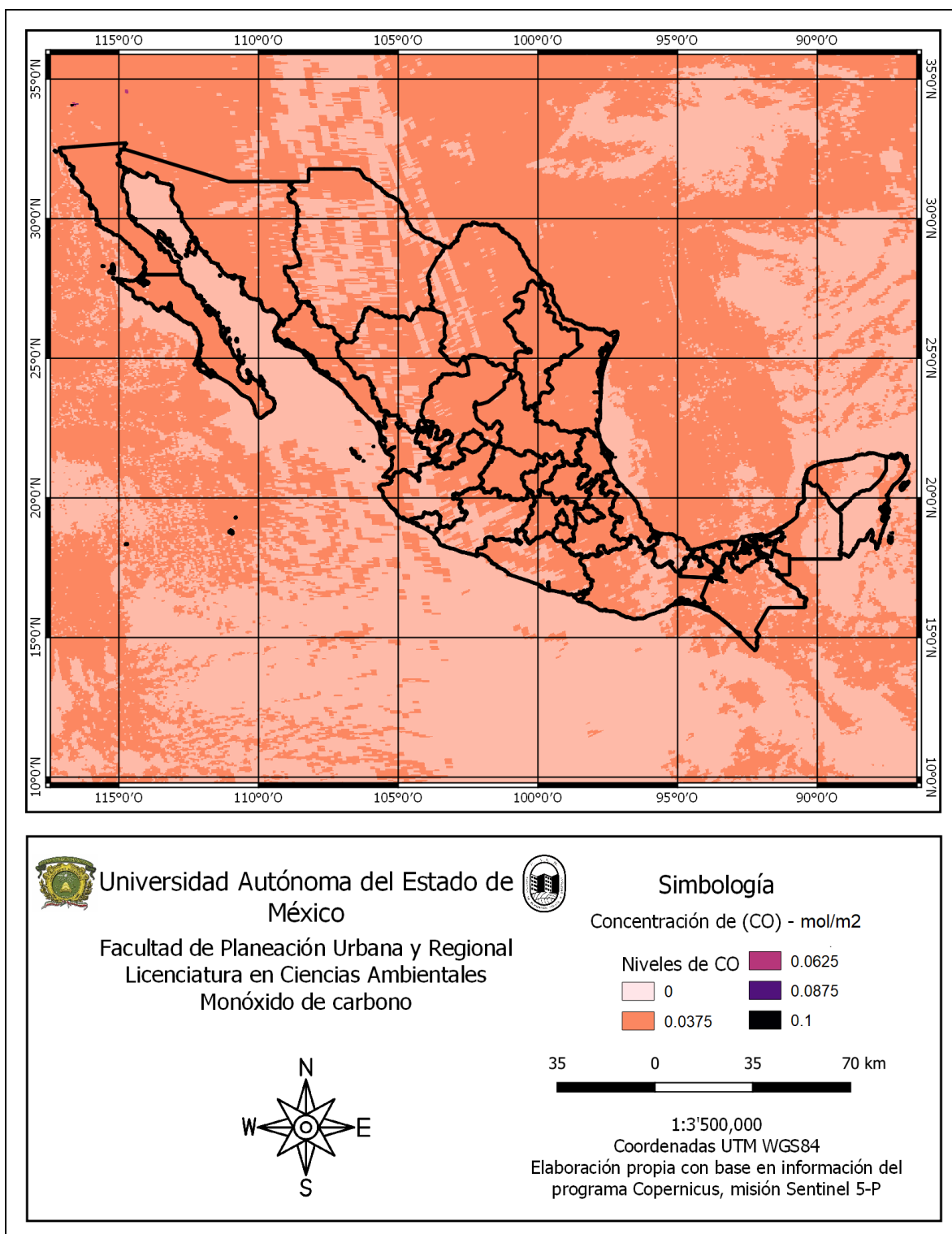
en regiones orográficas como el Eje Neovolcánico Transversal y las Sierras Madre Oriental y Occidental.

A su vez, la distribución de ciudades parece tener cierta significancia respecto a la distribución de contaminantes. En el mapa 5.12, podemos apreciar dicha relación en la zona centro del país, donde la presencia de ciudades es mucho mayor a la del resto del territorio.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

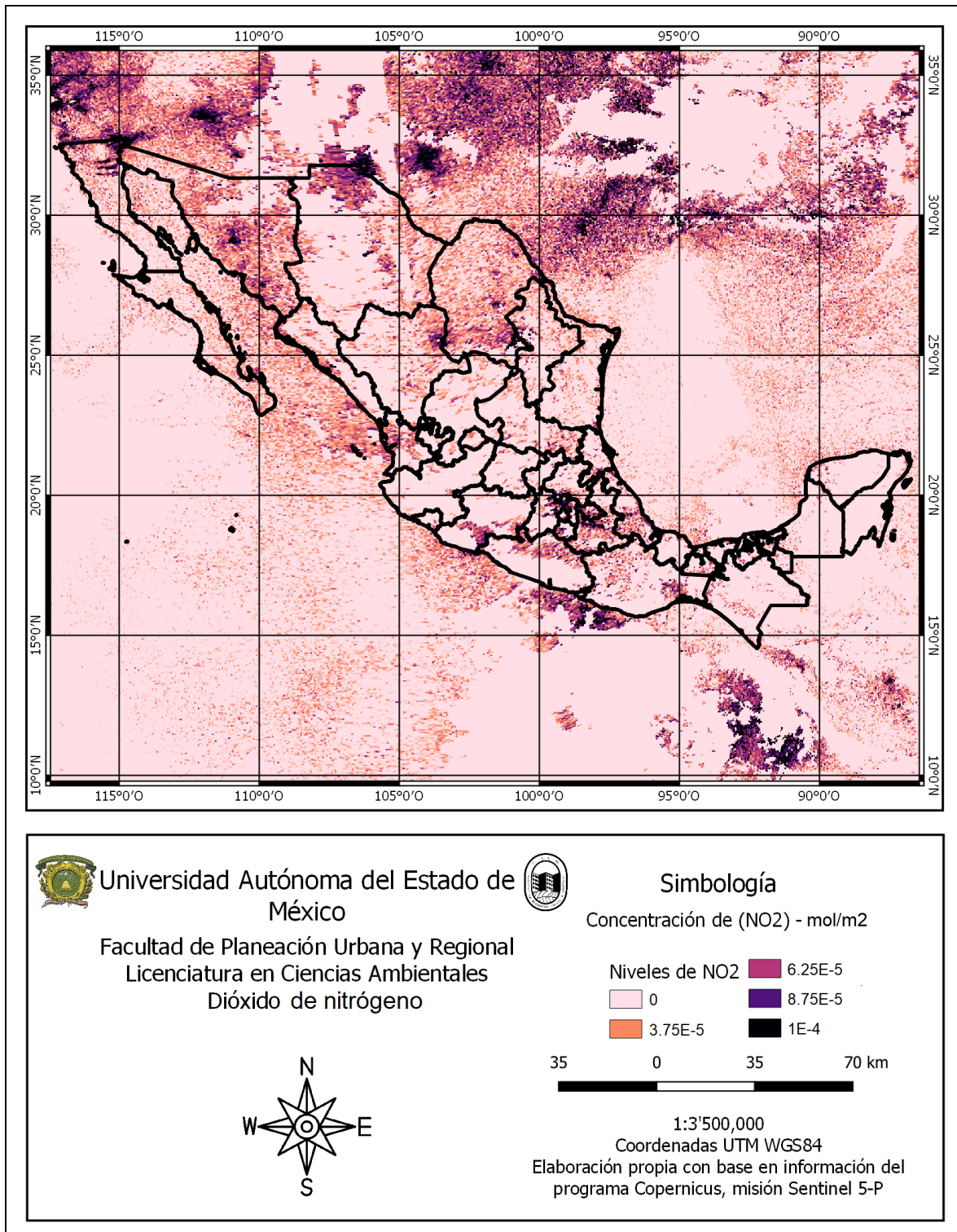
Nº de mapa	Descripción
5.7	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.8	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.9	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.10	Velocidad del viento
5.11	Hipsometría de México
5.12	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.7 Concentración de monóxido de carbono (CO), primavera 2020.



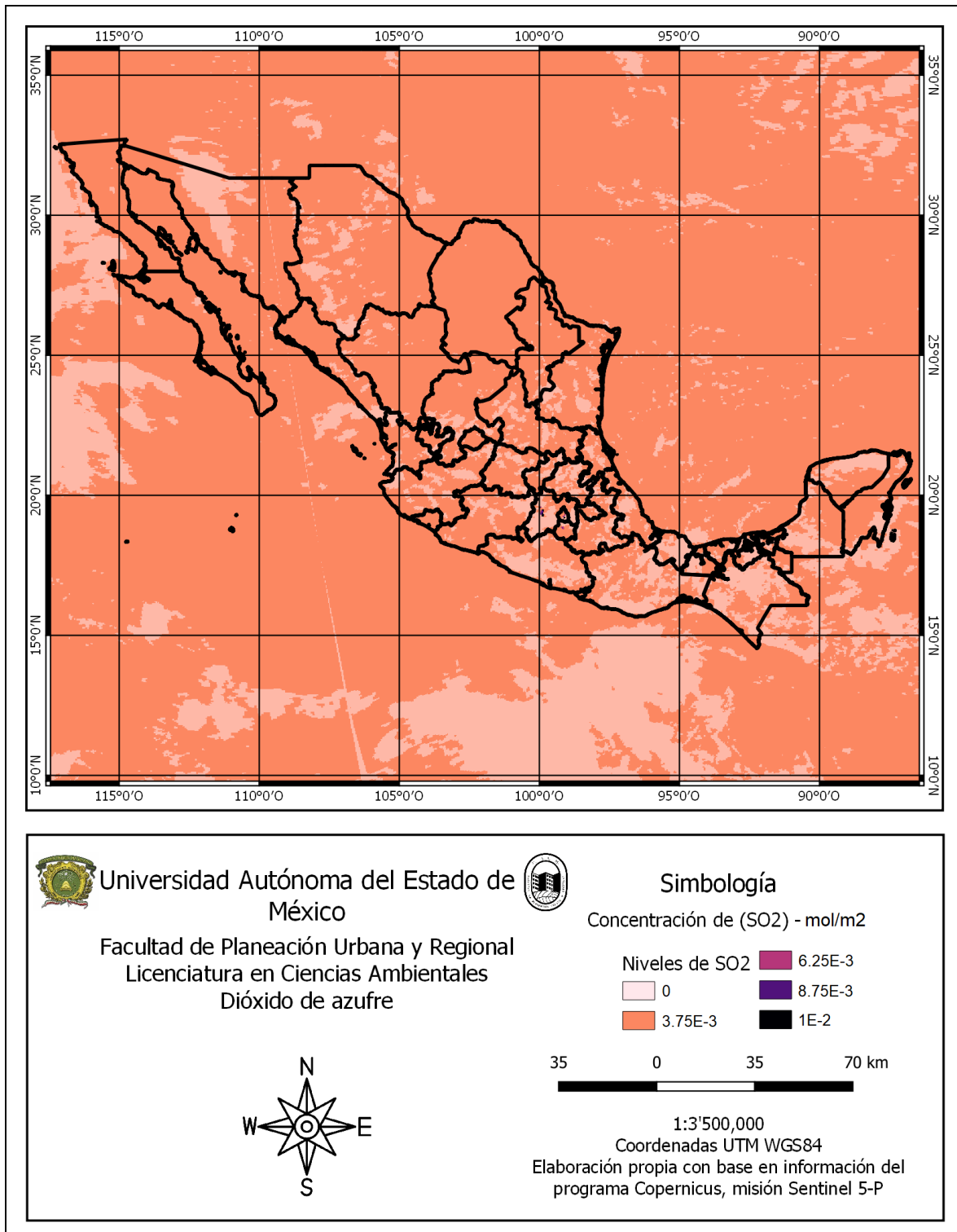
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.8 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), primavera 2020.



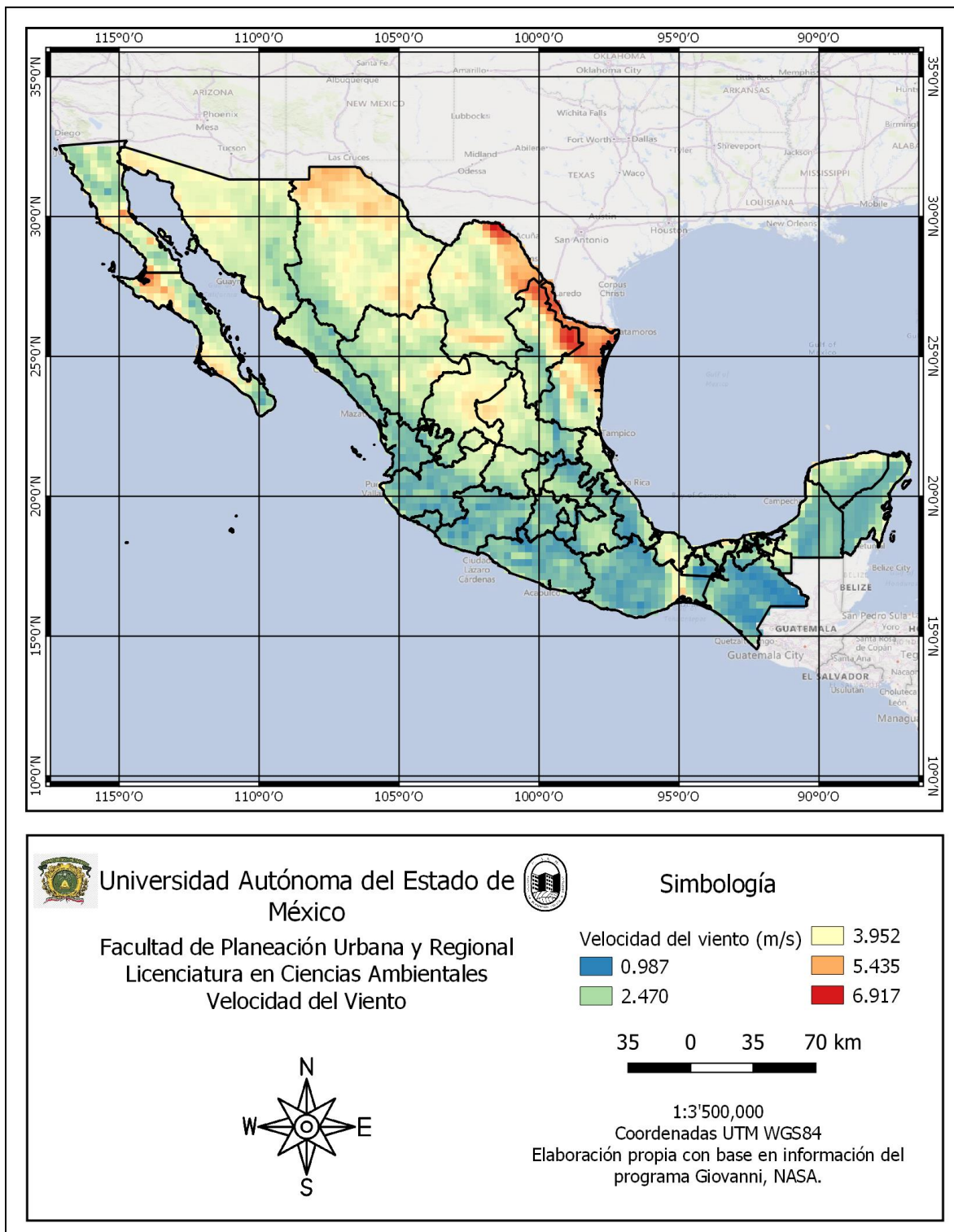
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.9 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), primavera 2020.



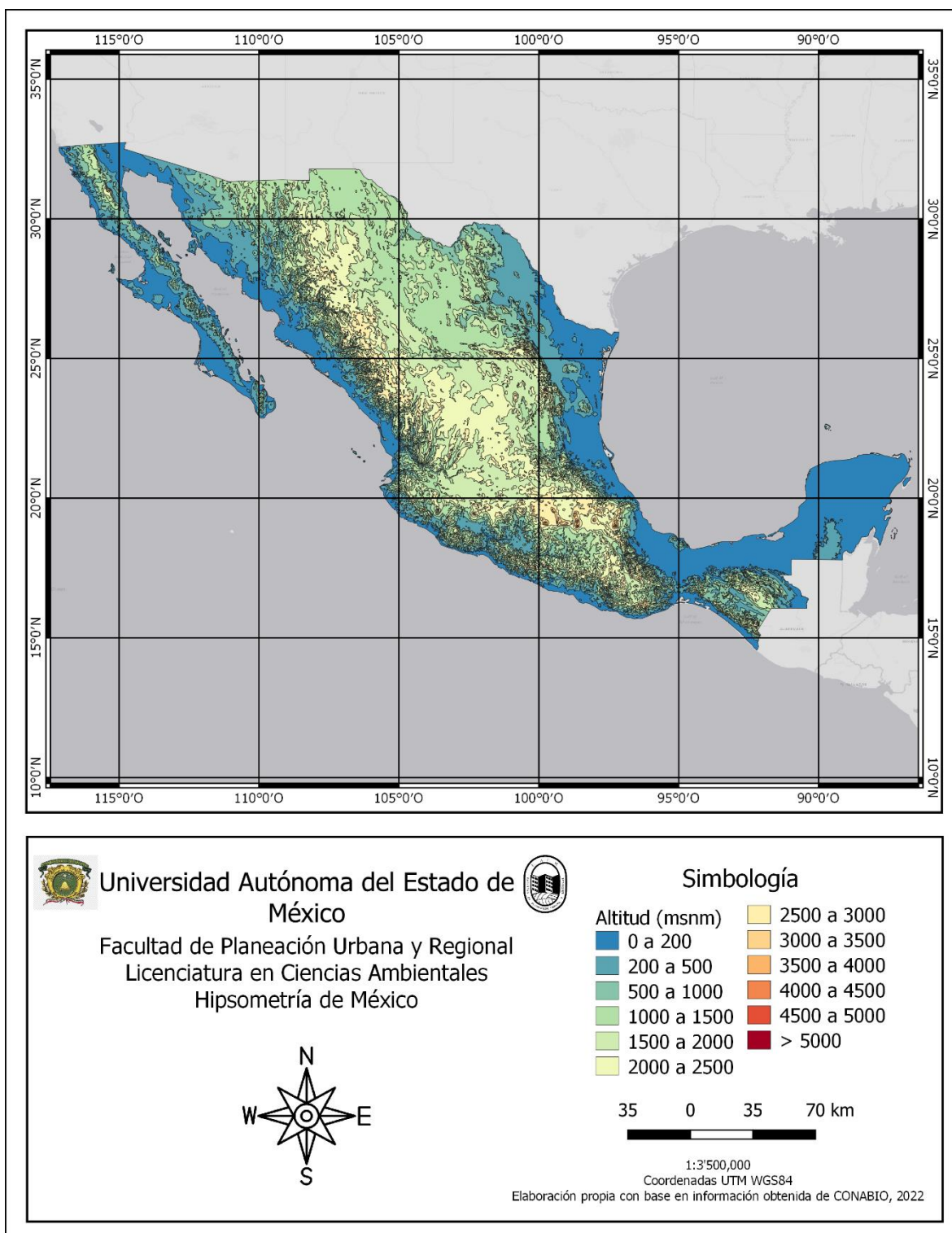
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.10 Velocidad del viento en m/s, primavera 2020.



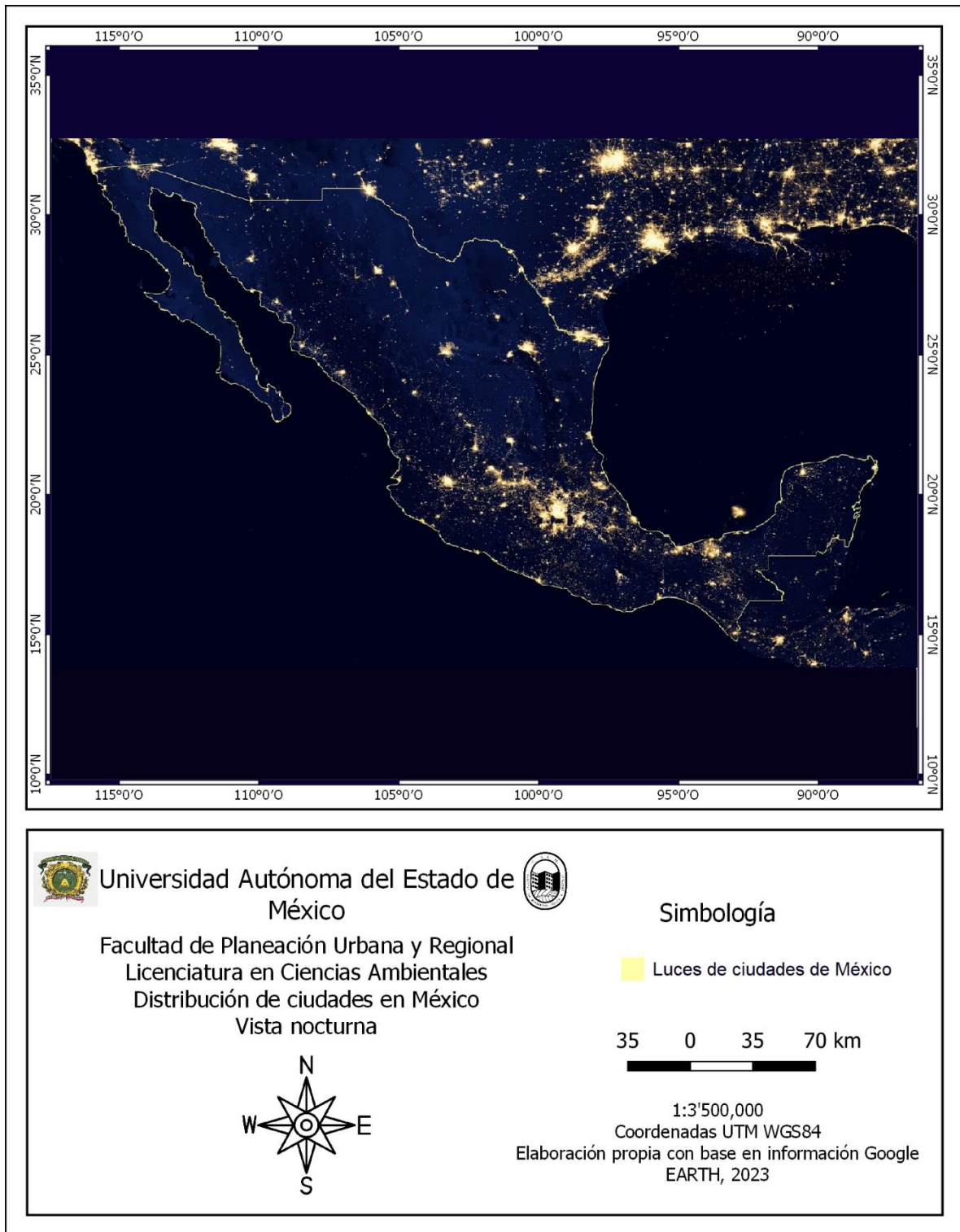
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.11 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.12 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.3 Verano 2019

Respecto a la información obtenida para el verano 2019, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen variables que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso del verano 2019, el día tomado como referencia es el 05 de mayo, en un horario de entre 16:00 y 18:00 h para todos los contaminantes y variables. Es apreciable que, en todos los casos, las zonas más afectadas del país son las zonas oriente, occidente, noroeste y sureste. Para el resto del país, existen concentraciones, aunque en menor cantidad.

5.3.1 Monóxido de carbono (CO)

Durante el verano 2019 y de acuerdo con el mapa 5.13, los niveles de monóxido de carbono son constantes a lo largo de toda la república, ya que estos no sobrepasan los 0.02 mol/m^2 , aunque también es apreciable una presencia significativa de nubes en la zona occidente, noroeste y centro del país.

5.3.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Respecto al dióxido de nitrógeno y tomando como referencia el mapa 5.14, los niveles máximos de concentración, se registran en las zonas centro, noreste y noroeste del país, en estados como Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Aguascalientes, Jalisco, Coahuila, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, Durango, Baja California y Baja California Sur; en estos estados, las concentraciones de NO_2 , se encontraron entre los 3.5E^{-5} y los $1\text{E}^{-4} \text{ mol/m}^2$, mientras que, en el resto del país, no se superan valores de $2.5\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$.

5.3.3 Dióxido de azufre (SO_2)

La información presentada para el dióxido de azufre revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.25\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana.

Los vientos más rápidos del verano 2019, se muestran en el mapa 5.16, en la zona noreste del país, en estados como Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, alcanzando los 6.876 m/s. Es apreciable que, en estados como Baja California, el viento no supera los 3 m/s, esto influiría en la concentración descrita para el dióxido de nitrógeno en dicho estado, para el resto de la república, los vientos oscilan entre los 0.671 y los 2.222 m/s, afectando también en la concentración de contaminantes.

Cabe resaltar que, en relación a la composición orográfica, que es en el estado de Baja California donde se aprecia la mayor cantidad de concentración de dióxido de nitrógeno, las ciudades más afectadas son Tijuana y Mexicali, sin embargo la disminución es considerable entre estas dos, la explicación podría encontrarse en

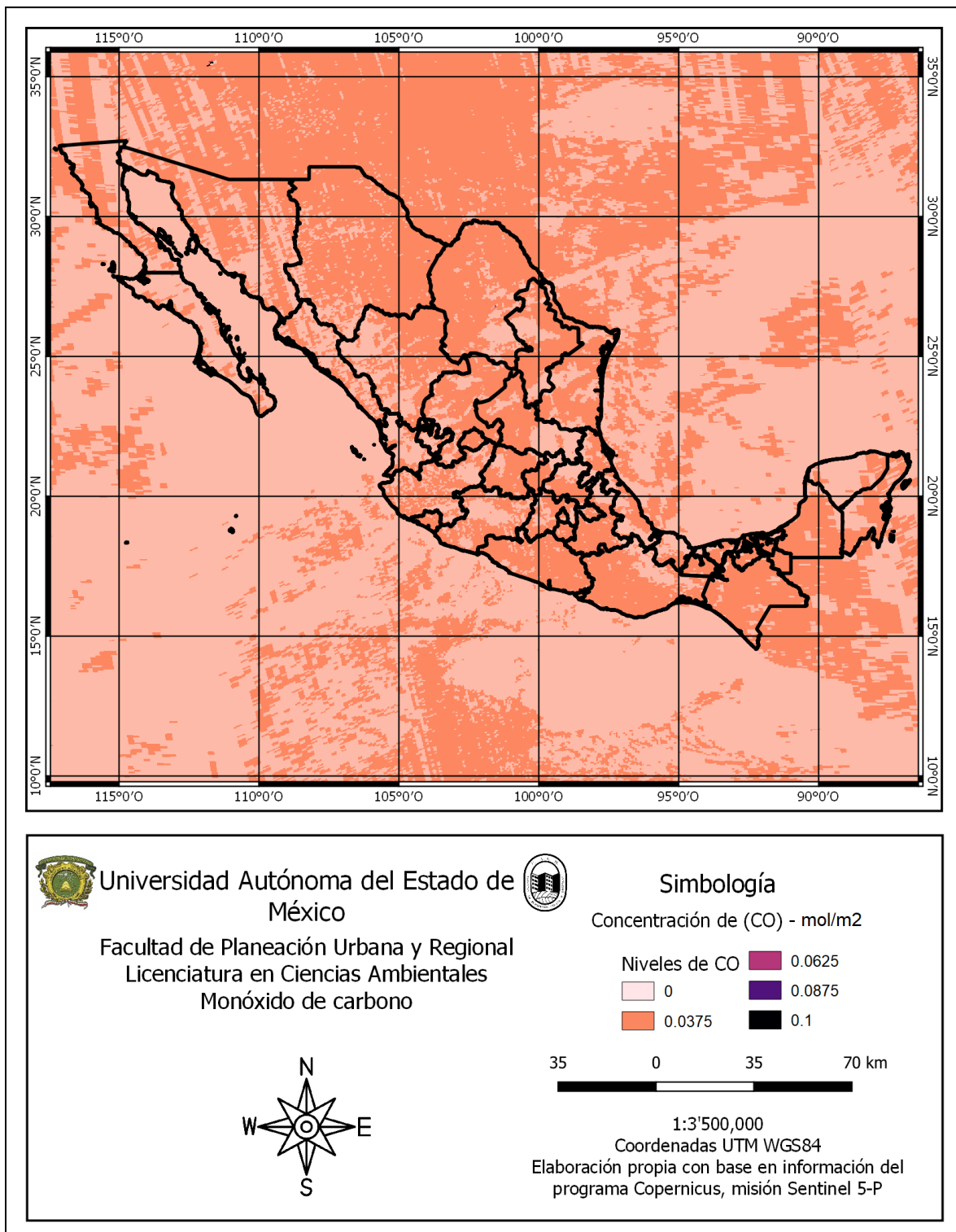
la presencia de un conjunto de elevaciones en dicha región, correspondientes a la Sierra Peralta, Sierra Juárez, Sierra de San Pedro Martir y la Sierra de San Miguel. Lo anterior se aprecia en el mapa 5.17

Caso similar ocurre con la distribución de las ciudades, ya que, tanto Tijuana como Mexicali, son urbes de tamaño y población considerable respecto a otras en el país, por tanto, la concentración en estos puntos también es elevada respecto a otras áreas geográficas. En la zona centro, también es apreciable cierta relación, aunque en menor proporción.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

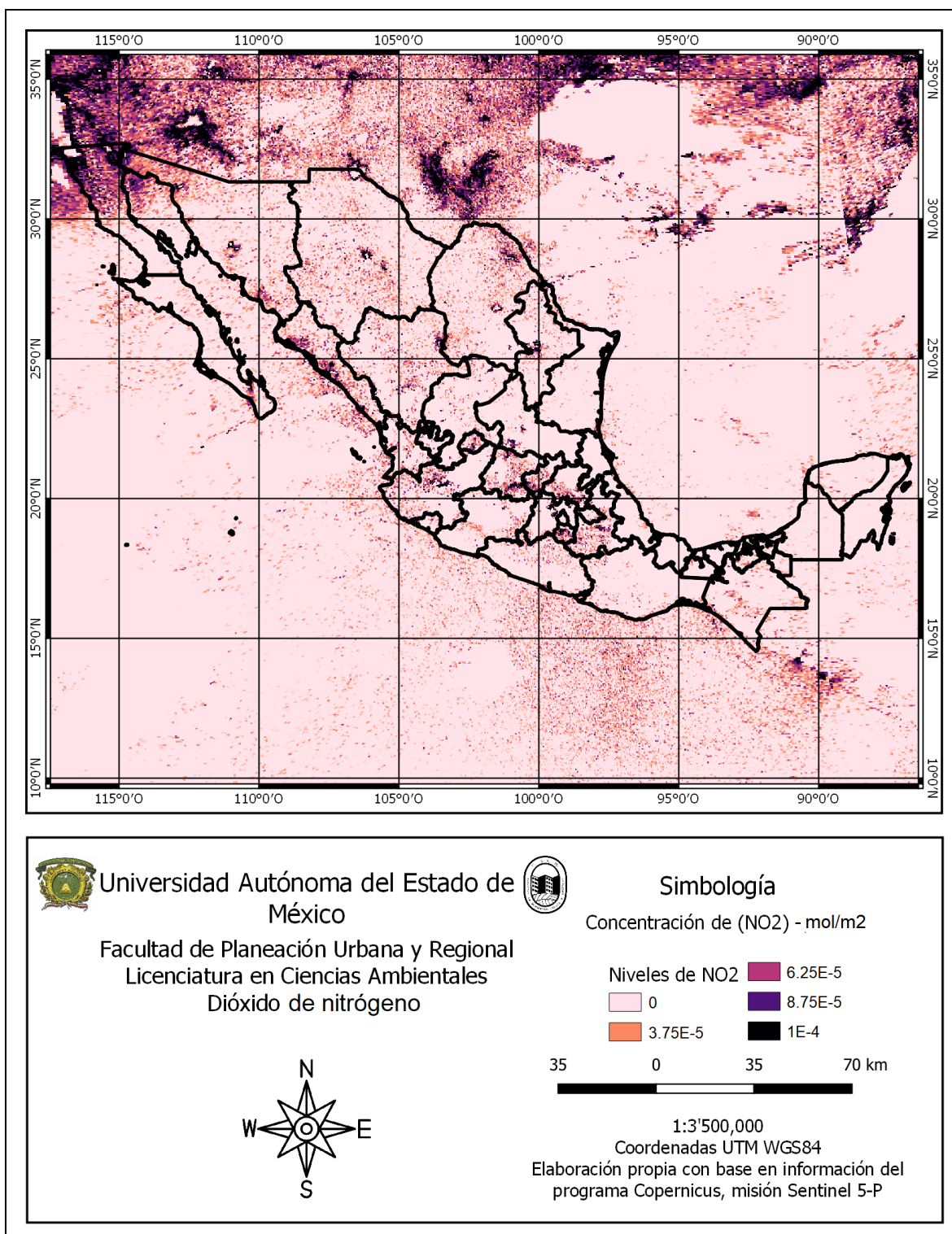
Nº de mapa	Descripción
5.13	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.14	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.15	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.16	Velocidad del viento
5.17	Hipsometría de México
5.18	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.13 Concentración de monóxido de carbono (CO), verano 2019.



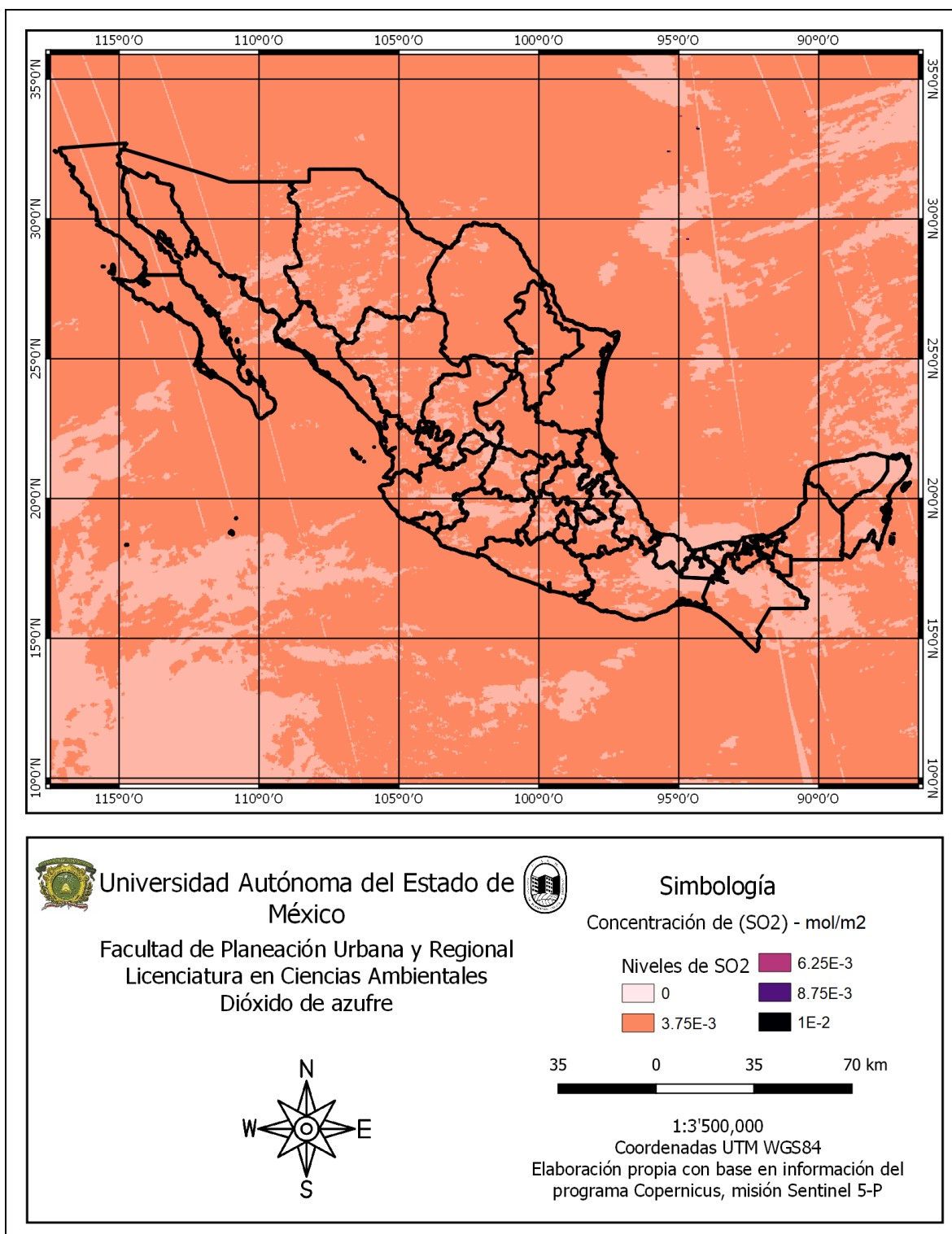
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.14 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), verano 2019.



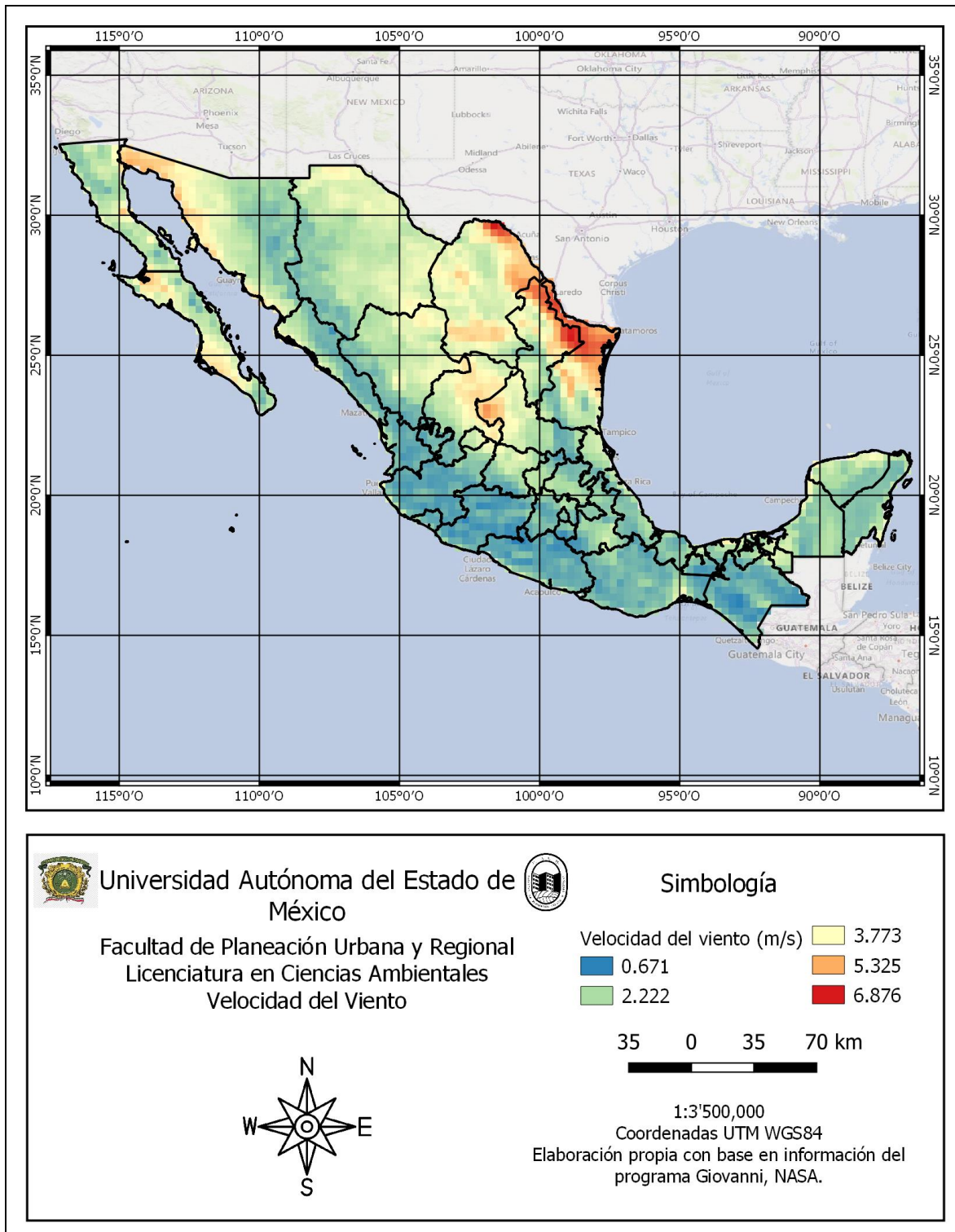
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.15 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), verano 2019.



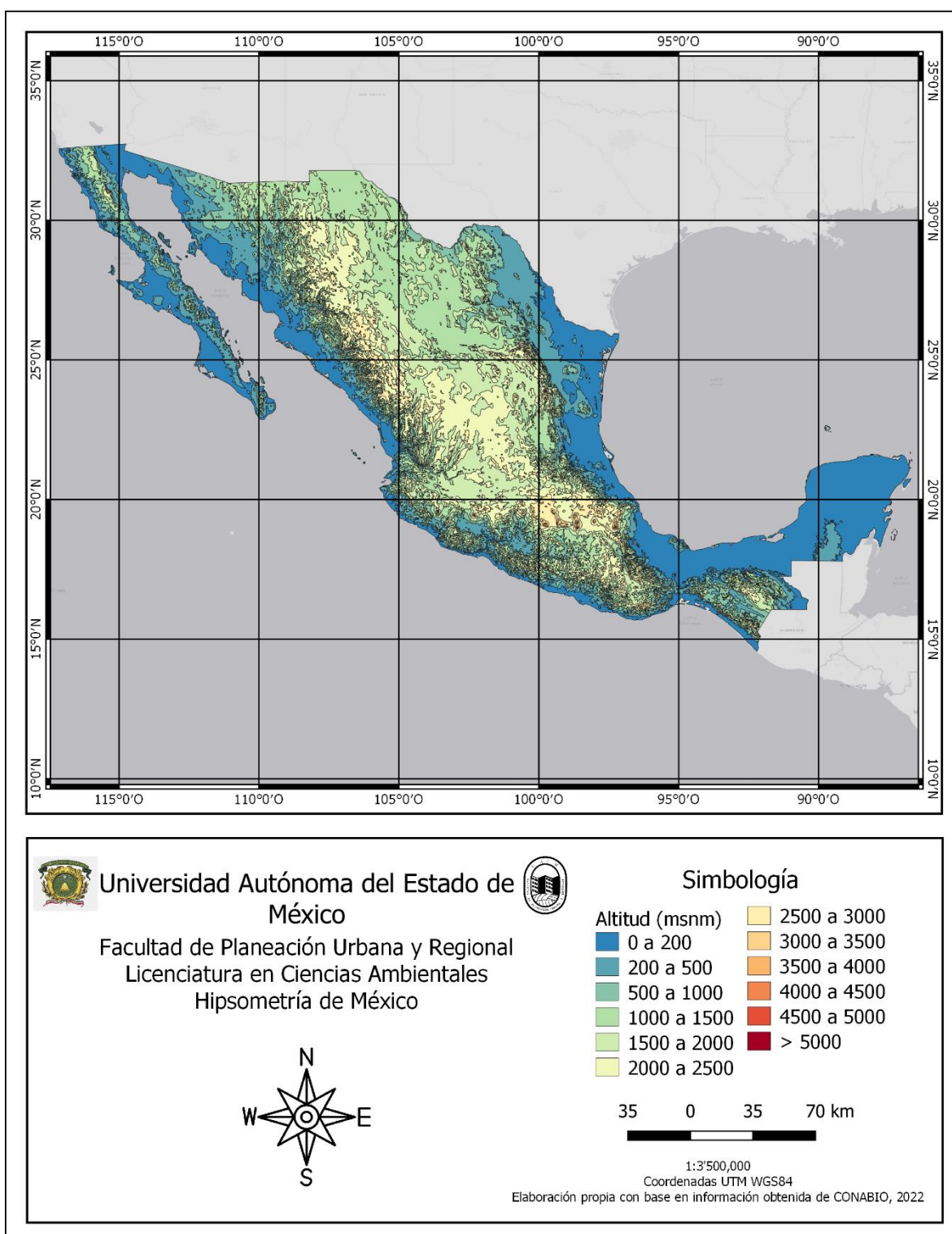
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.16 Velocidad del viento en m/s, verano 2019.



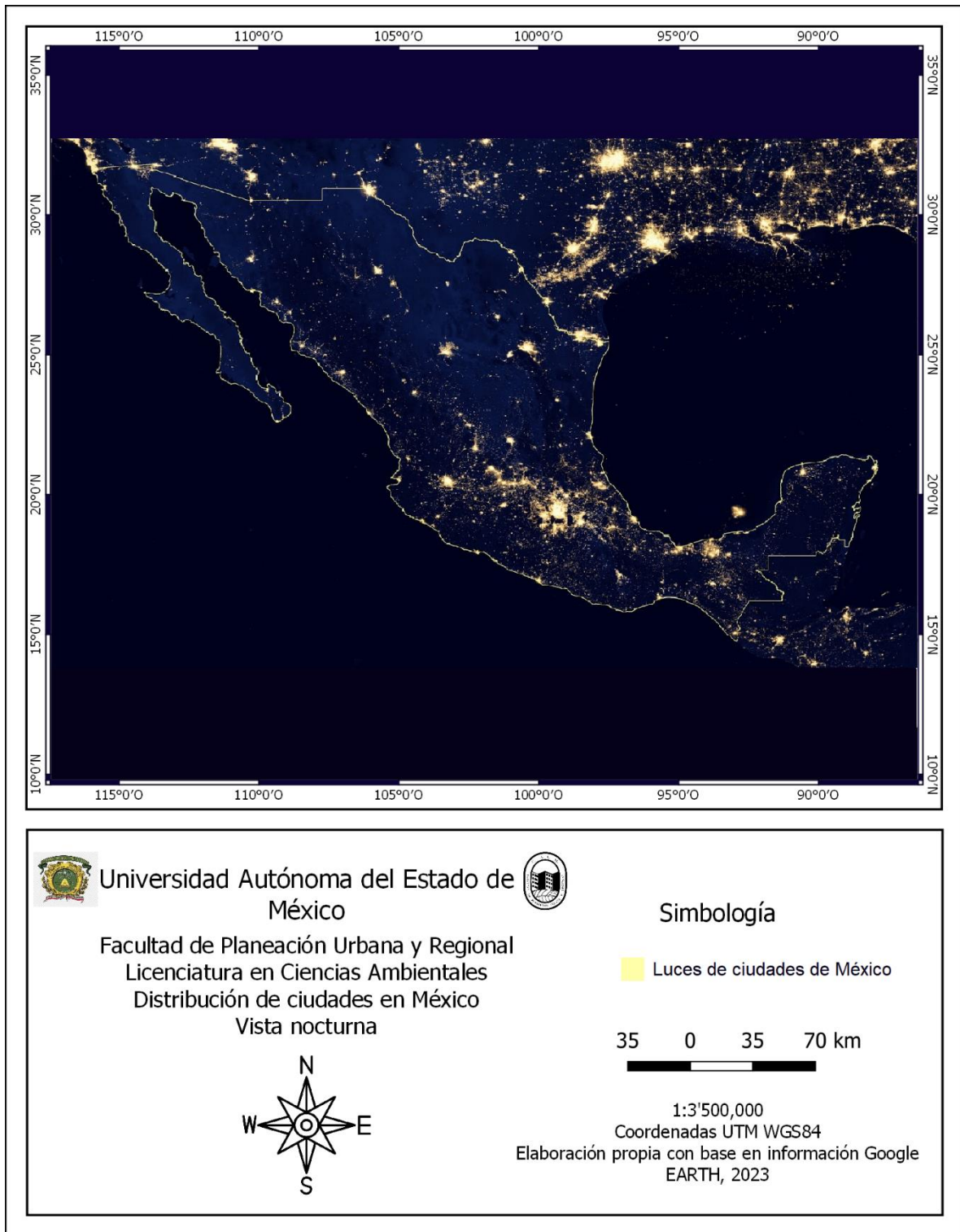
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.17 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.18 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.4 Verano 2020

Respecto a la información obtenida para el verano 2020, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen variables que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso del verano 2020, el día tomado como referencia es el 05 de agosto, en un horario de entre las 16:00 y las 18:00 h para todos los contaminantes y variables. Se aprecia que, en todos los casos, las áreas más afectadas del país son las regiones centro, occidente, noreste y noroeste. Para el resto del país, existen concentraciones, aunque en menor cantidad.

5.4.1 Monóxido de carbono (CO)

Tomando como referencia el mapa 5.19, encontramos que, durante el verano 2020 se observan niveles de monóxido de carbono que se mantienen uniformes en la República y no sobrepasan los 0.02 mol/m^2 . La presencia de nubes para el día 05 de mayo, es apreciable principalmente en las zonas noroeste y suroeste del país, limitando la visibilidad de posibles concentraciones que sean más elevadas.

5.4.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Durante el mismo periodo y de acuerdo al mapa 5.20, el dióxido de nitrógeno es apreciable en concentraciones que van desde los 3.5E^{-5} hasta los $9\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, esto en las regiones noroeste, noreste y centro del país, presentes en estados como Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Nayarit, Jalisco, Nuevo León, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Michoacán, Guerrero, Morelos y la CDMX. Asimismo, es apreciable la presencia de NO_2 en el resto del país, sin embargo, las concentraciones se mantienen entre los 0.01 y los $3\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, con presencia significativa también, en el Océano Pacífico.

5.4.3 Dióxido de azufre (SO_2)

La información presentada para el dióxido de azufre revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.3\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana, sin embargo, la presencia de nubes imposibilita un análisis en las zonas noroeste y suroeste.

En relación con la velocidad del viento y de acuerdo al mapa 5.22, las velocidades más altas, las encontramos en las regiones noroeste y noreste del país, alcanzando los 6.531 m/s, mientras que, aquellas con velocidades más bajas, corresponden a las regiones occidente, oriente y suroeste, ubicándose entre los 0.720 y los 2.172 m/s. Es apreciable una relación significativa entre aquellas zonas donde el viento alcanza velocidades más altas en comparación con la presencia de dióxido de nitrógeno, principalmente en las regiones noreste y noreste.

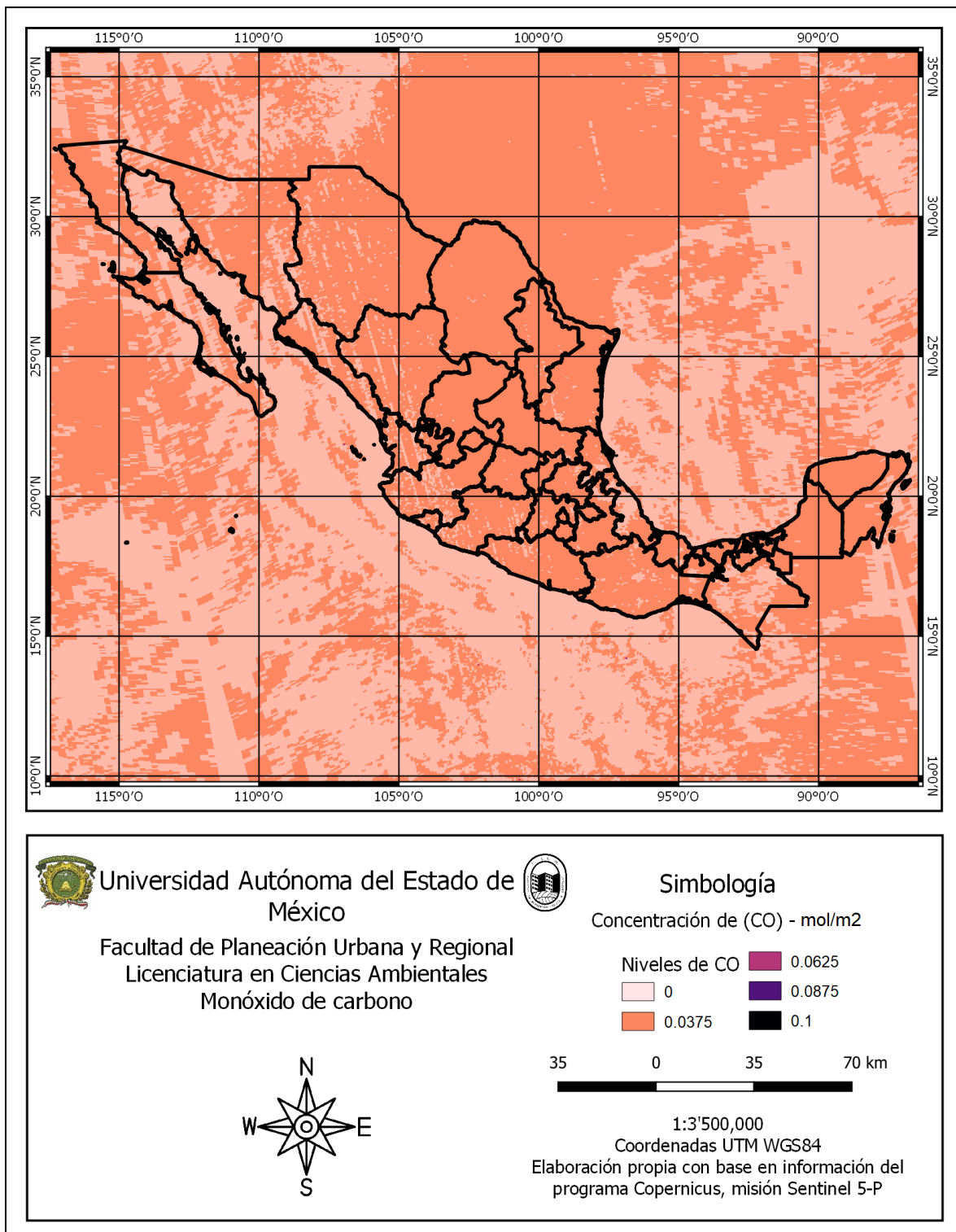
La orografía juega un papel importante durante esta temporalidad, ya que en el mapa 5.23, la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico coinciden con las más altas concentraciones del país. Esto puede deberse principalmente al comportamiento del viento en los sistemas montañosos, ya que, durante el día, el viento circula desde las partes bajas hacia las más elevadas, provocando una mayor concentración en puntos específicos.

En cuanto a la distribución de ciudades y tal como lo muestra el mapa 5.24, las zonas que podrían verse más afectadas son la zona centro y noreste del país.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

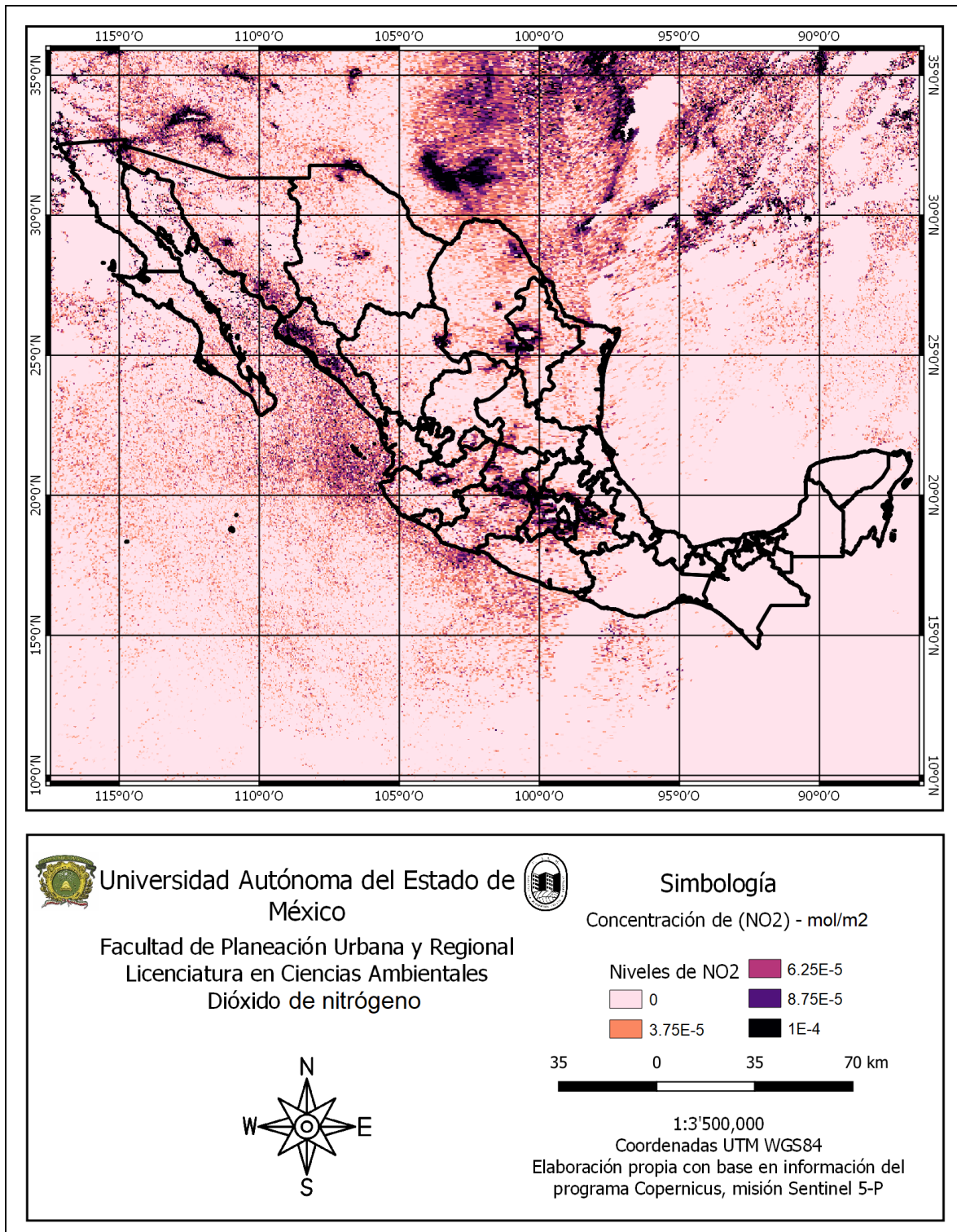
Nº de mapa	Descripción
5.19	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.20	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.21	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.22	Velocidad del viento
5.23	Hipsometría de México
5.24	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.19 Concentración de monóxido de carbono (CO), verano 2020.



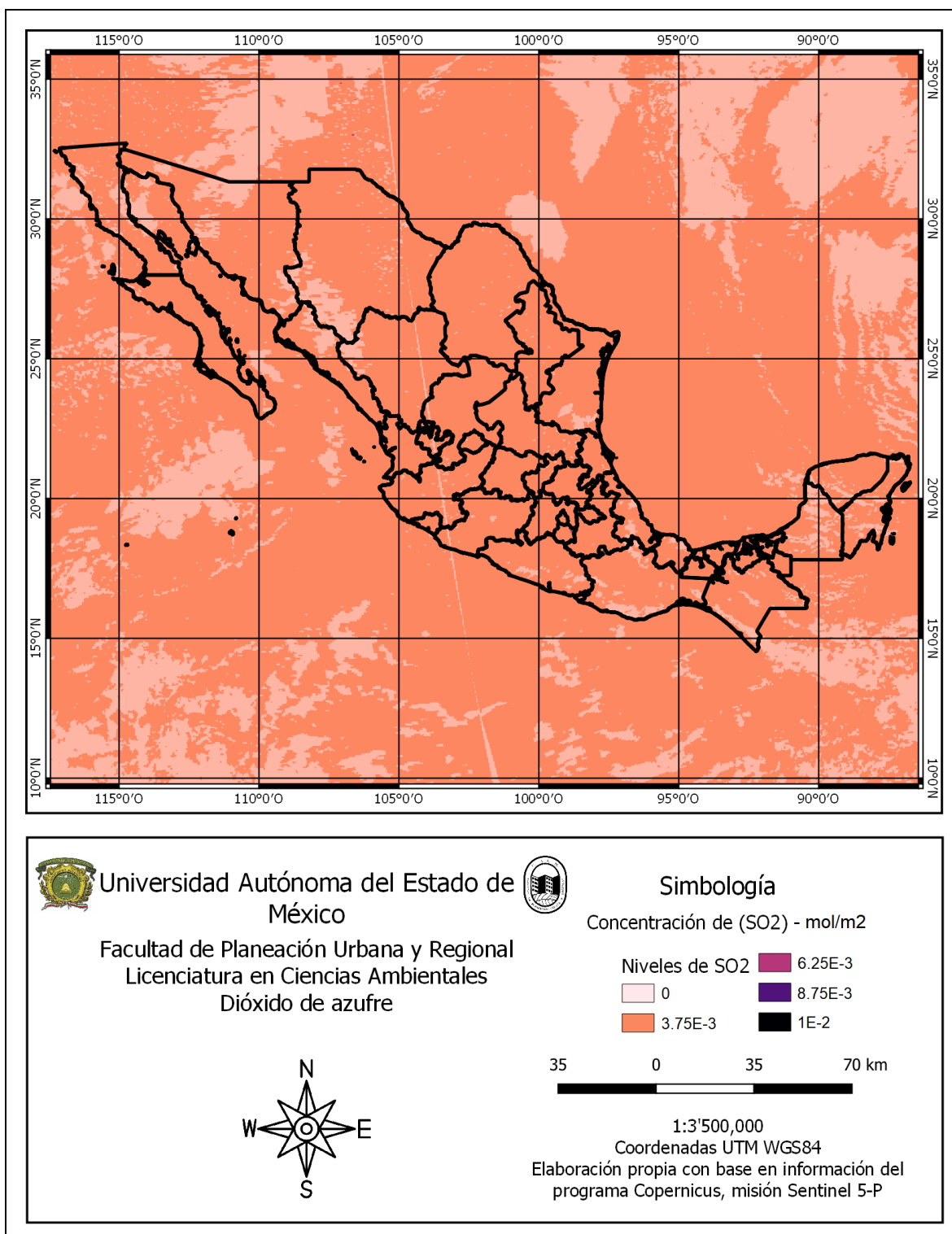
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.20 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), verano 2020.



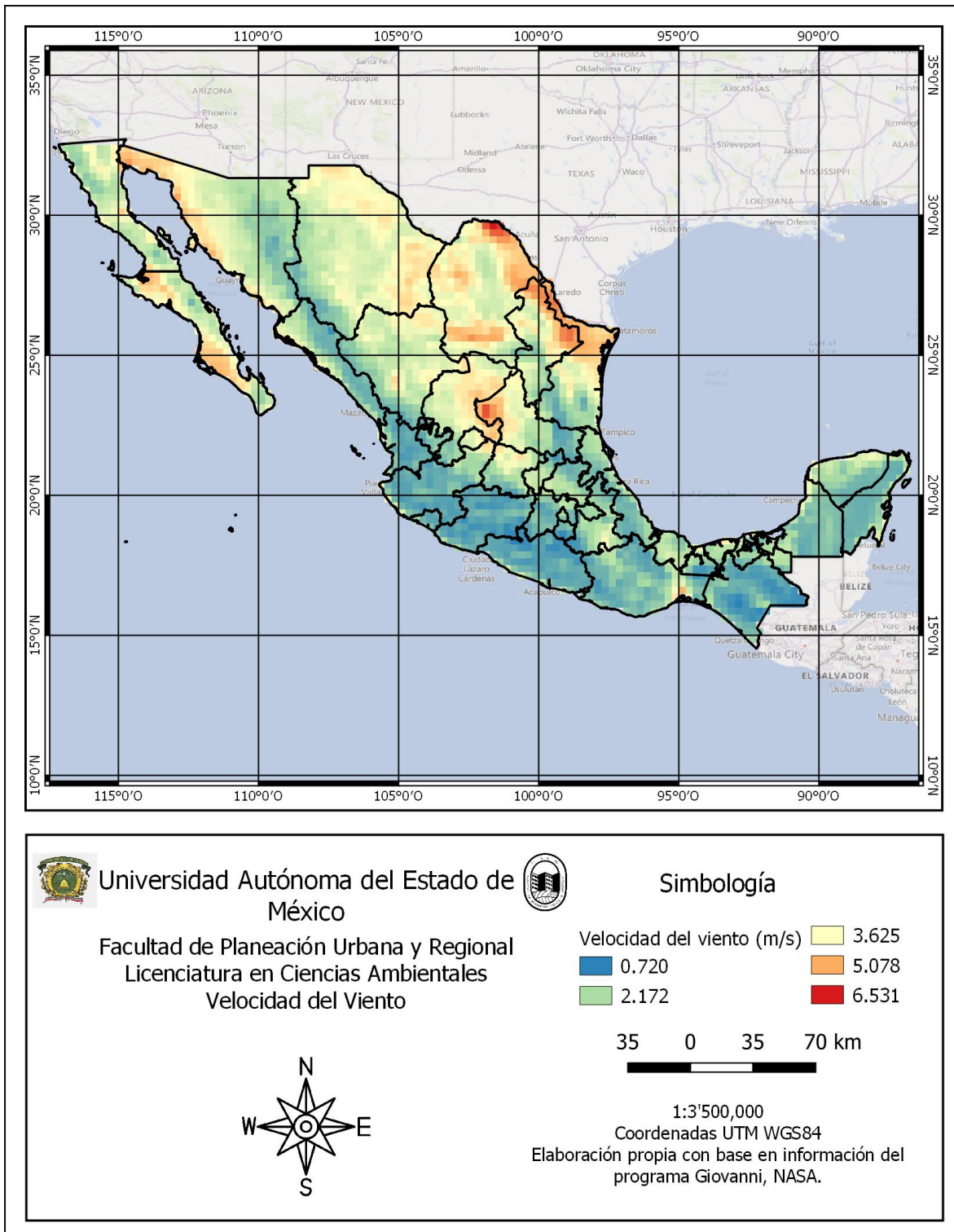
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.21 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), verano 2020.



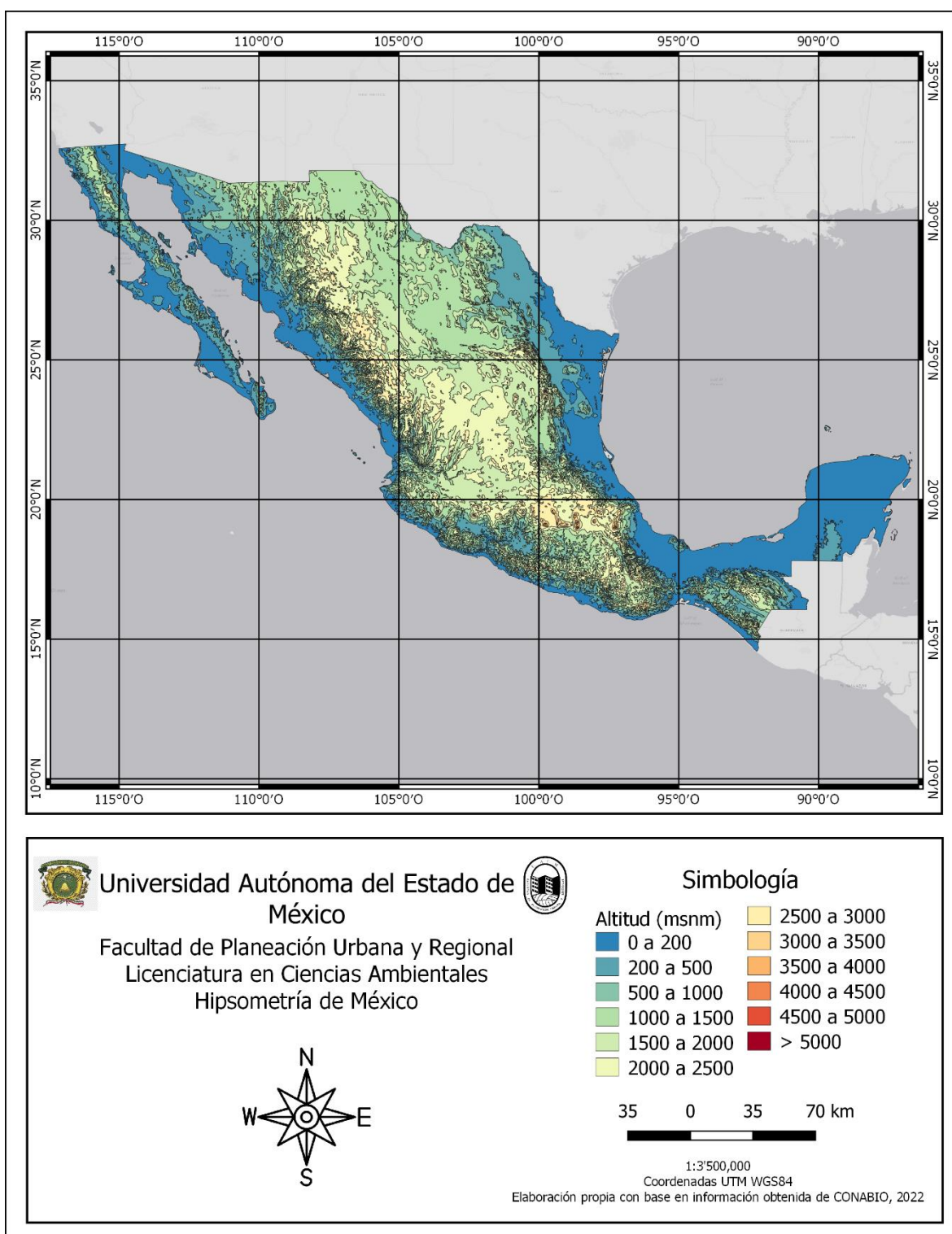
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.22 Velocidad del viento en m/s, verano 2020.



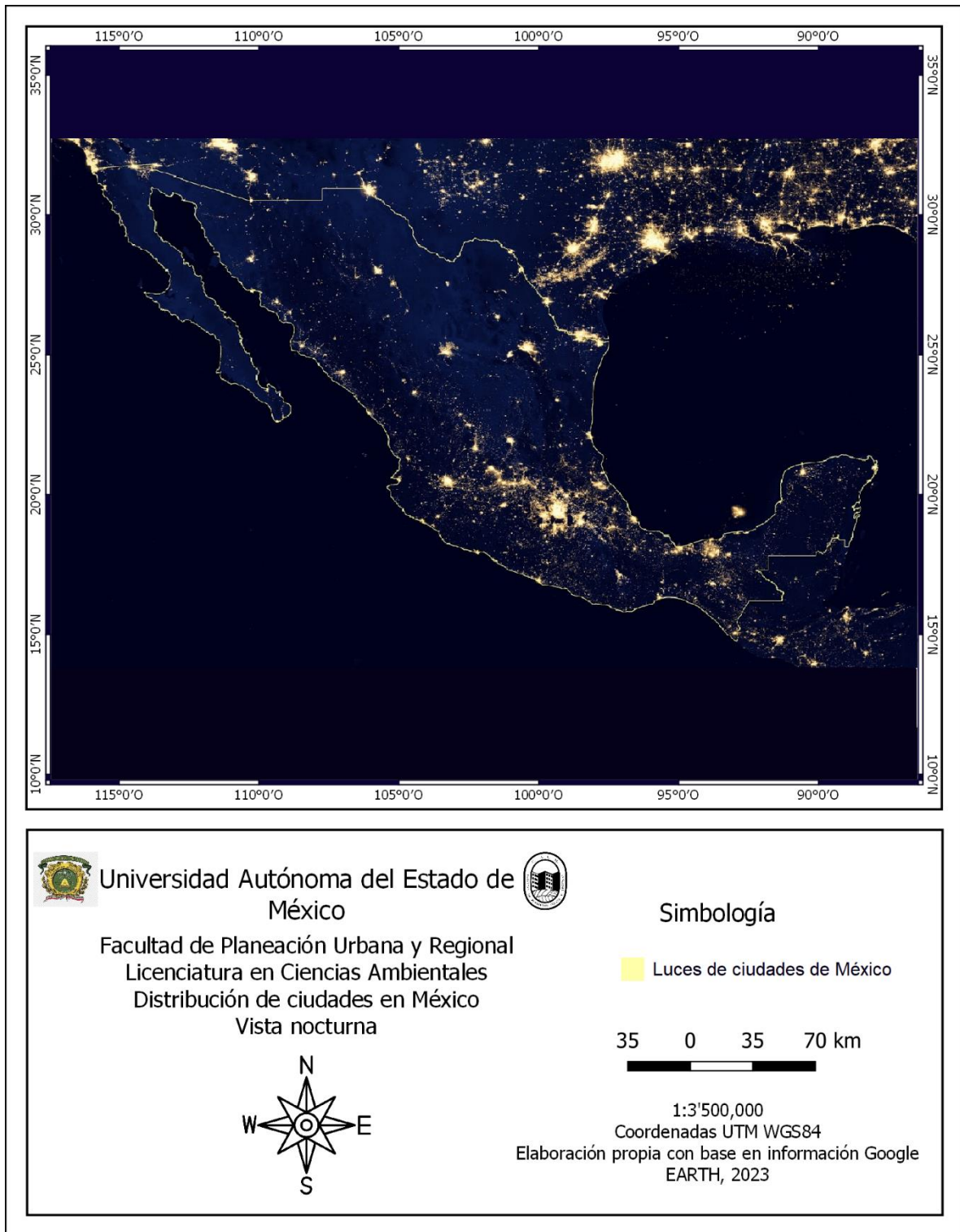
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.23 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.24 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.5 Otoño 2019

Respecto a la información obtenida para el otoño 2019, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen factores que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso del otoño 2019, el día tomado como referencia es el 05 de mayo, en un horario de entre las 16:00 y las 18:00 h para todos los contaminantes y factores. Se muestra que en todos los casos, las zonas más afectadas del país son las zonas norte, noreste y oriente. Para el resto del país, existen concentraciones, aunque en menor cantidad.

5.5.1 Monóxido de carbono (CO)

Tomando como referencia el mapa 5.25, encontramos que, durante el otoño 2019 se observan niveles de monóxido de carbono que se mantienen uniformes en la República y no sobrepasan los 0.02 mol/m^2 .

5.5.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

En el mapa 5.26, se muestra la distribución y las concentraciones más elevadas de todas las temporalidades analizadas, estas van desde los 4E^{-5} hasta los $1\text{E}^{-4} \text{ mol/m}^2$, esto en las regiones noroeste, noreste, oriente y centro alcanzando estados como Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Morelos, Puebla, Oaxaca y Veracruz. Asimismo, es apreciable la presencia significativa de NO_2 que se extiende por todo el territorio restante, sin embargo, las concentraciones se mantienen entre los 0.01 y los $3.9\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, algunas llegando incluso, al Golfo de México y al Golfo de California.

5.5.3 Dióxido de azufre (SO_2)

La información presentada para el dióxido de azufre contenida en el mapa 5.27, revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.3\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana.

En relación con la velocidad del viento y de acuerdo al mapa 5.28, las velocidades también son de las más bajas que se analizaron, llegando a los 7.883 m/s solo en la localidad conocida como “La Ventosa”, Oaxaca; esta zona es característica por tener los vientos más rápidos y constantes de todo el país. El resto de la república se mantiene entre los 0.563 m/s y los 4.223 m/s, siendo vientos muy calmados y que tienen un efecto dispersor muy bajo en los contaminantes.

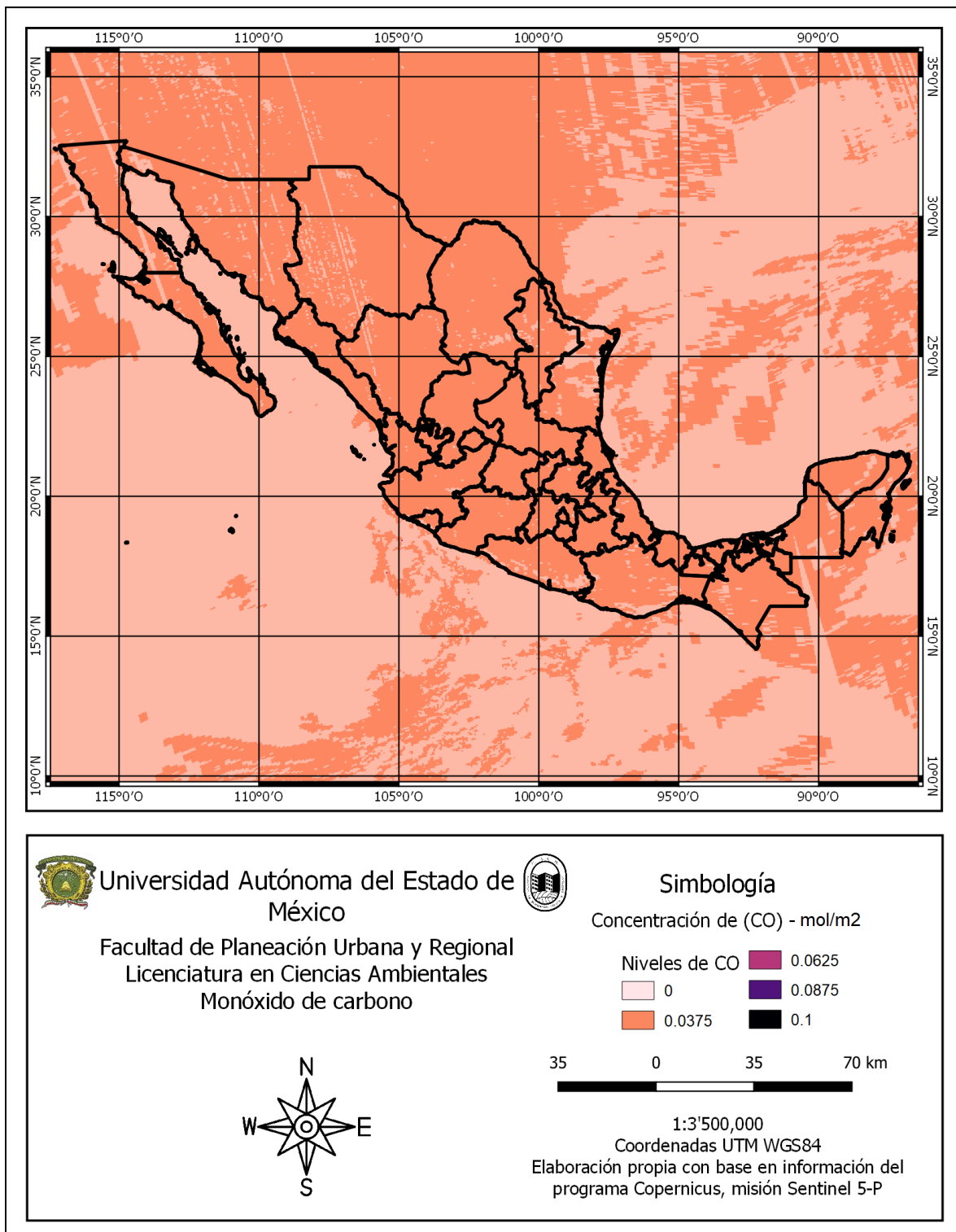
De acuerdo con el mapa 5.29, la hipsometría en México no representa un factor determinante en la presencia de contaminantes, esto tomando como referencia las altas concentraciones de NO_2 a lo largo del país.

En cuanto a la distribución de ciudades, parece que existe una relación significativa en cuanto a la concentración de contaminantes, principalmente en las regiones oriente, noroeste y noreste.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

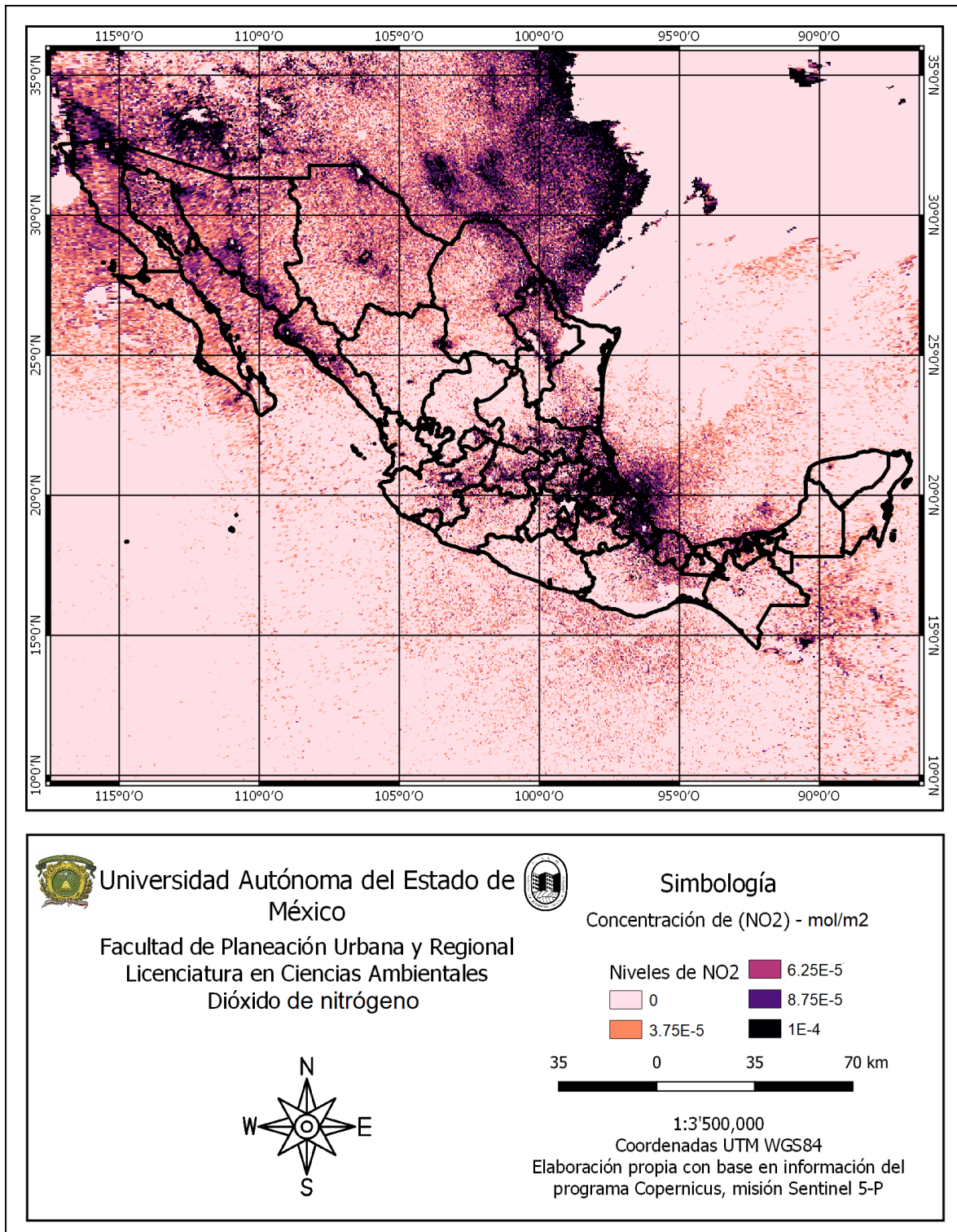
Nº de mapa	Descripción
5.25	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.26	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.27	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.28	Velocidad del viento
5.29	Hipsometría de México
5.30	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.25 Concentración de monóxido de carbono (CO), otoño 2019.



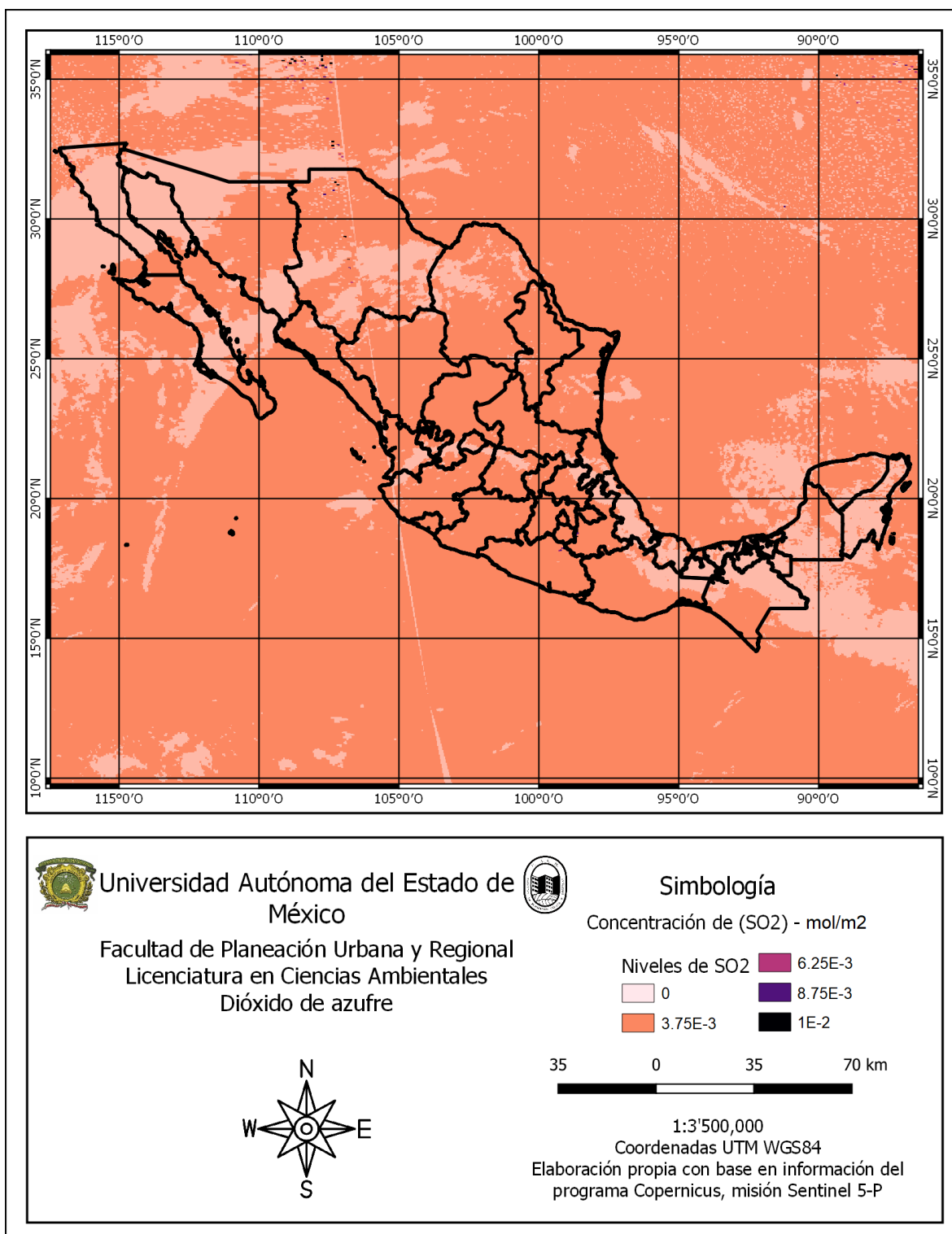
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.26 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), otoño 2019.



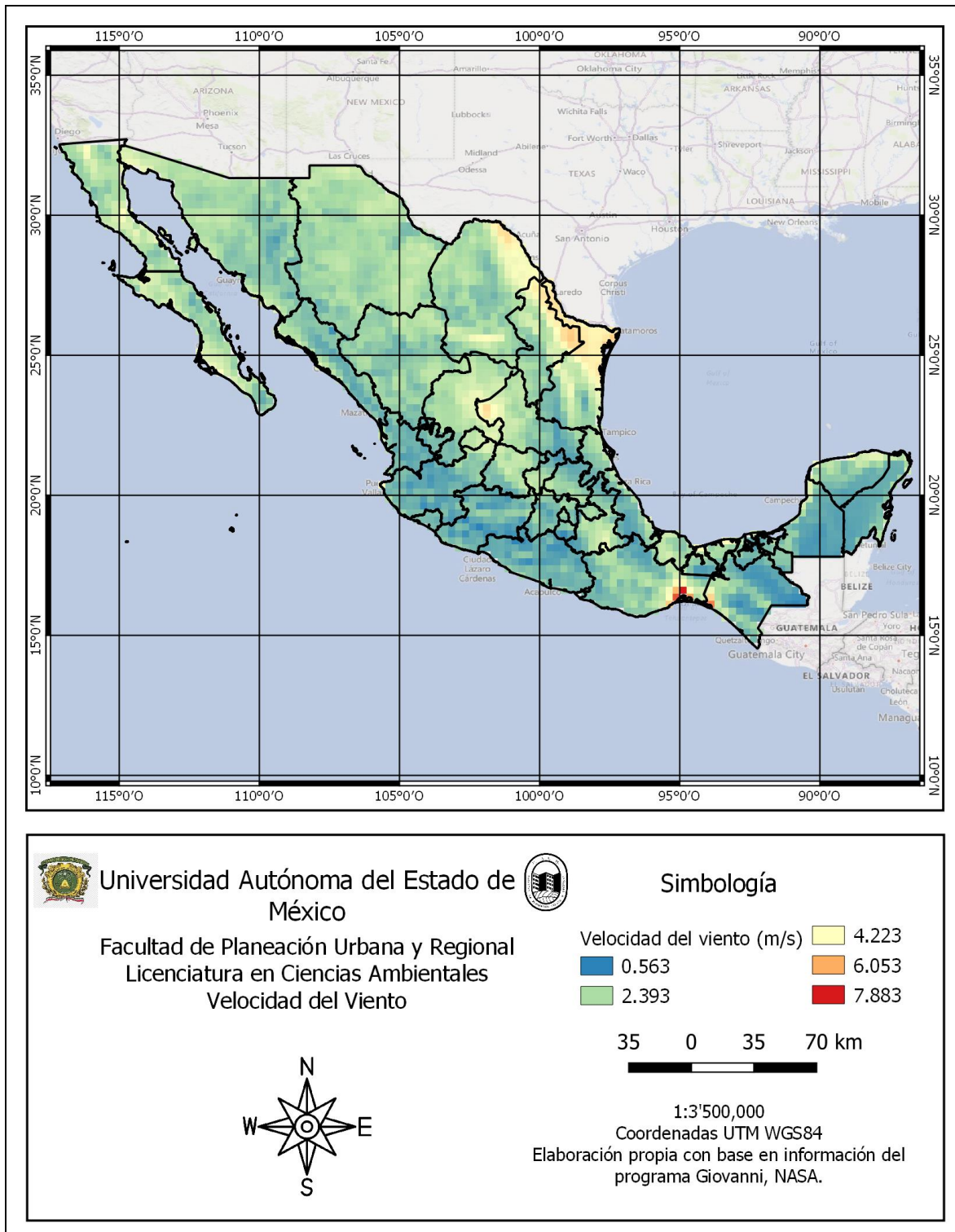
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.27 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), otoño 2019.



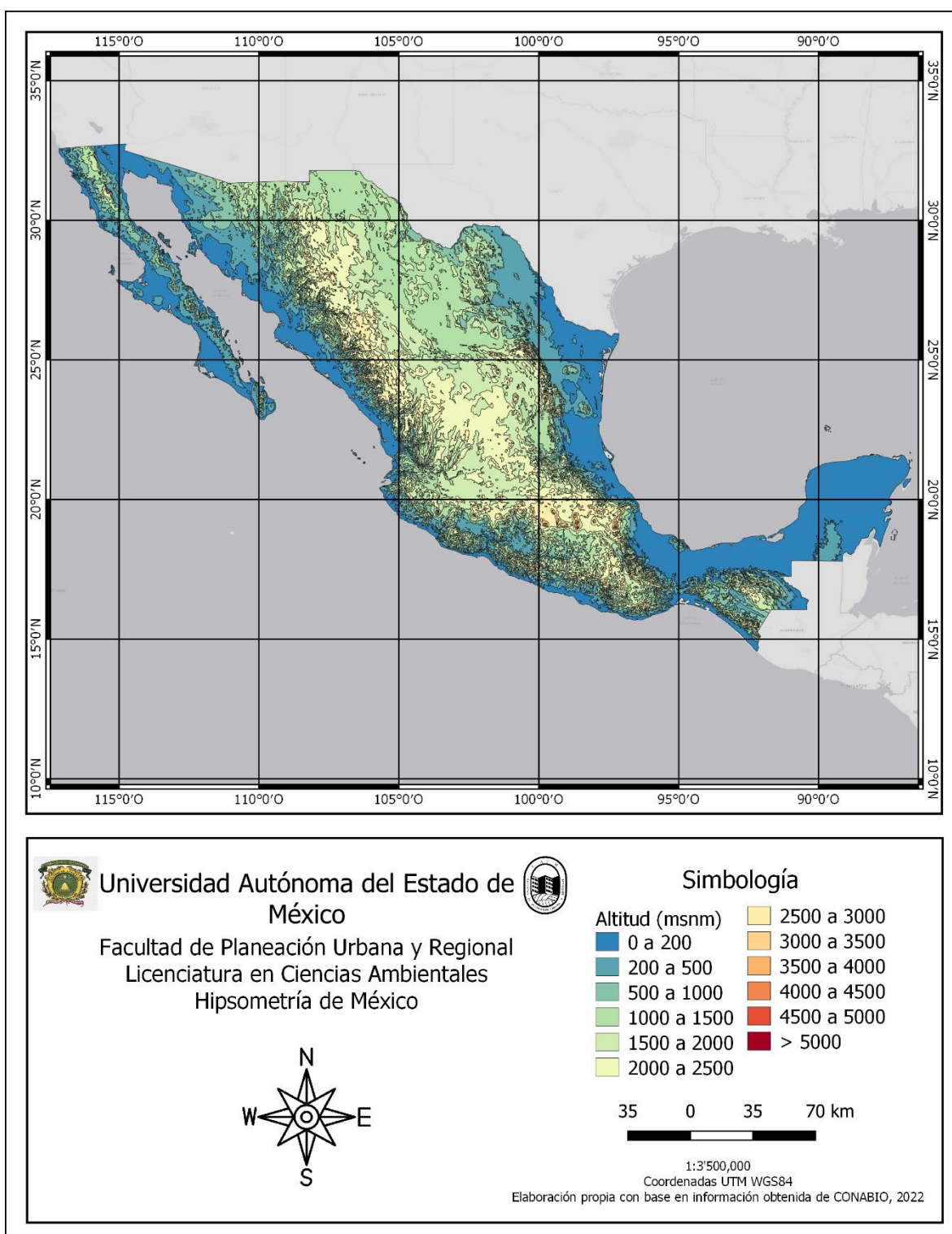
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.28 Velocidad del viento en m/s, otoño 2019.



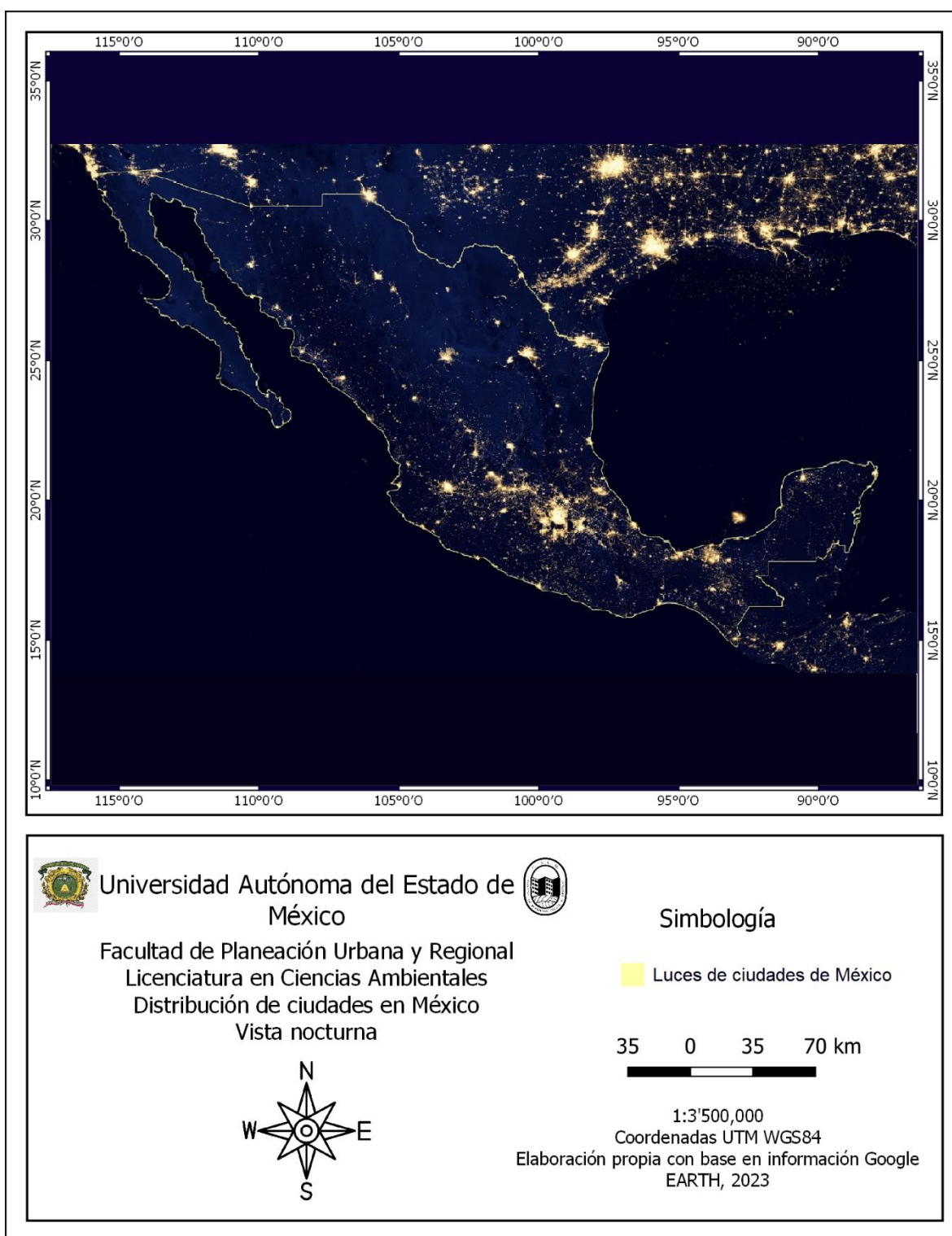
Fuente: elaboración propia con base en Giovani, NASA, 2022.

Mapa 5.29 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.30 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.6 Otoño 2020

Respecto a la información obtenida para el otoño 2020, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen variables que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso del otoño 2020, el día tomado como referencia es el 05 de agosto, en un horario de 16:00 a 18:00 h para todos los contaminantes y variables. Es apreciable que, en todos los casos, las zonas más afectadas del país son la zona noroeste, noreste y parte de la zona centro.

5.6.1 Monóxido de carbono (CO)

Durante la primavera 2020 y de acuerdo con el mapa 5.31, se observan niveles uniformes de monóxido de carbono a lo largo de la república, donde las concentraciones no superan los 0.02 mol/m^2 , sin embargo, hay que destacar que, la presencia de nubes afecta la visibilidad en determinados puntos del país, principalmente en la zona noreste, oriente y centro.

5.6.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

En lo relativo al dióxido de nitrógeno y tomando como referencia el mapa 5.32, las concentraciones máximas se registran en las zonas noroeste, noreste y centro, en estados como Baja California, Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Morelos y Puebla. Los niveles máximos registrados para dichos estados, rondan los 6E^{-5} y los $1\text{E}^{-4} \text{ mol/m}^2$, mientras que la mínima apreciable va desde los 1.25E^{-5} hasta los $3.75\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$. En la zona sur del país, son apreciables ligeras concentraciones que se encuentran alrededor de los $4\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$. El área restante del país no supera valores de $2.5\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$.

5.6.3 Dióxido de azufre (SO_2)

La información presentada para el dióxido de azufre revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.3\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana. La nubosidad es apreciable en diversos puntos como la zona noreste y centro, tal como lo muestra el mapa 5.9

Para la velocidad del viento y de acuerdo al mapa 5.34, las velocidades máximas alcanzadas son equivalentes a los 7.732 m/s , nuevamente en la localidad de “La Ventosa”. Los vientos más calmados de la zona centro y noroeste, podrían dar explicación a las concentraciones de NO_2 presentes en dichas áreas.

La hipsometría en el país no refleja una relación directa durante esta temporalidad, ya que en el mapa 5.35 podemos apreciar niveles significativos de contaminantes

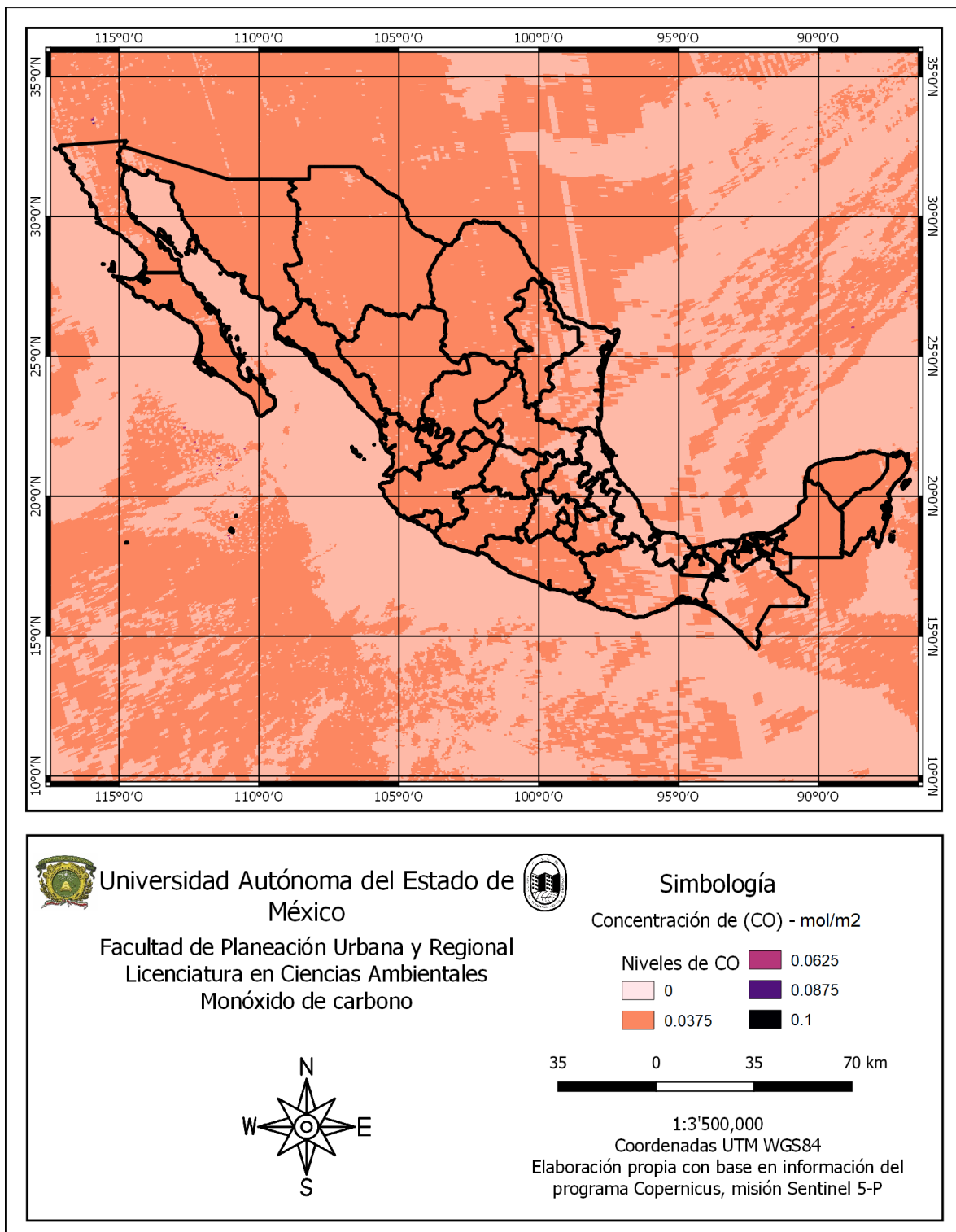
en regiones orográficas como el Eje Neovolcánico Transversal y las Sierras Madre Oriental y Occidental.

A su vez, la distribución de ciudades parece tener cierta significancia respecto a la distribución de contaminantes. En el mapa 5.36, podemos apreciar dicha relación en la zona centro del país, donde la presencia de ciudades es mucho mayor a la del resto del territorio.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

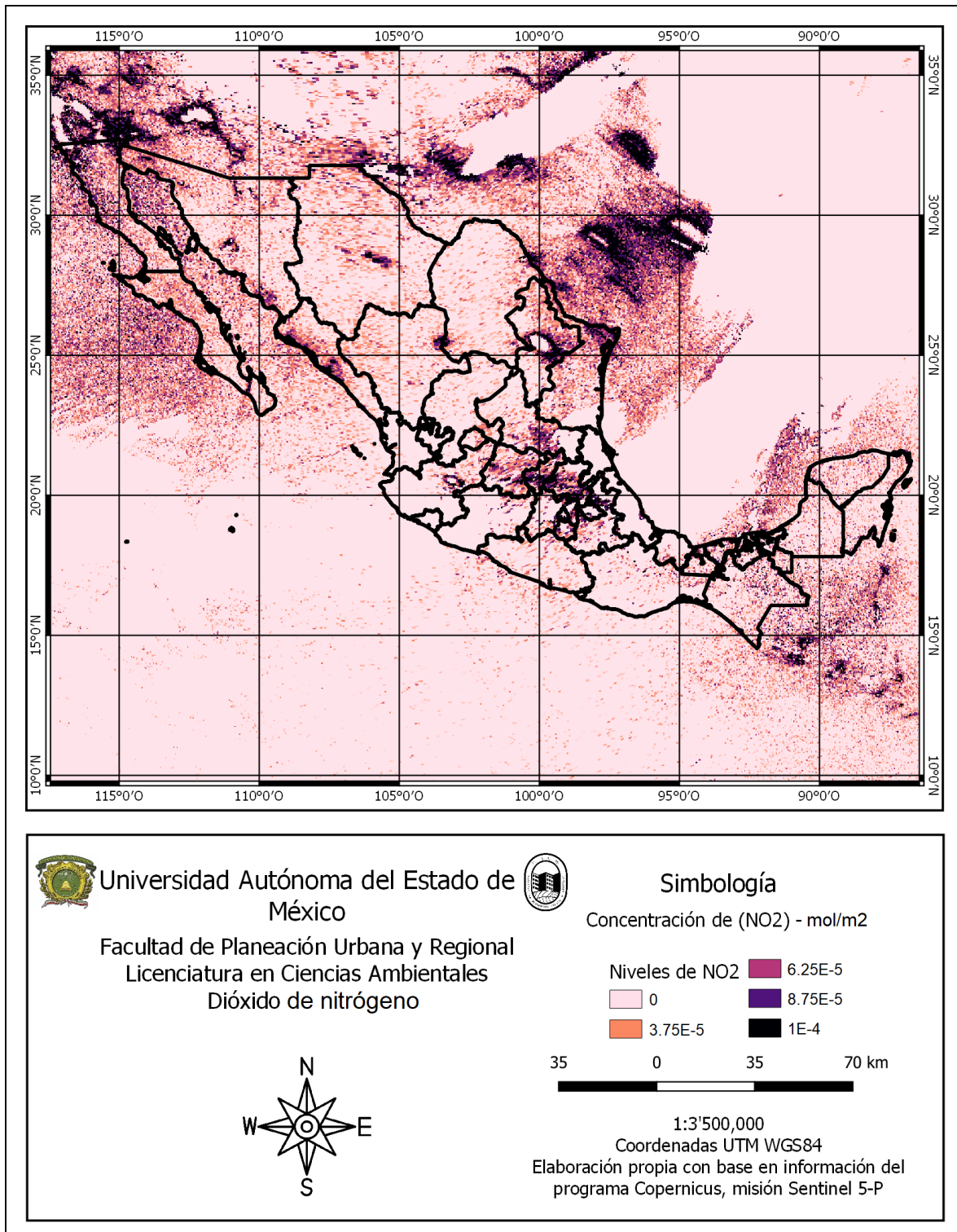
Nº de mapa	Descripción
5.31	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.32	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.33	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.34	Velocidad del viento
5.35	Hipsometría de México
5.36	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.31 Concentración de monóxido de carbono (CO), otoño 2020.



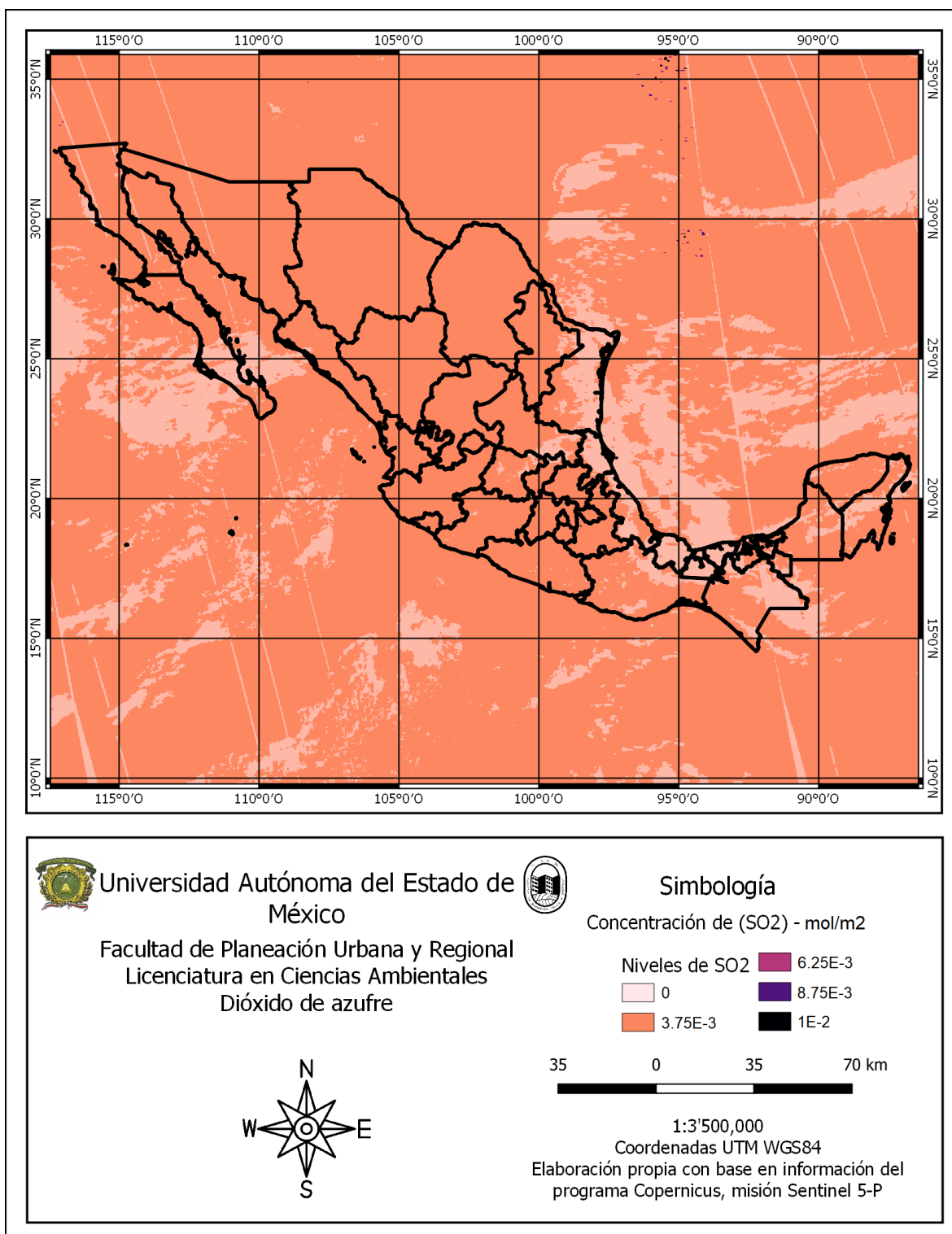
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.32 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), otoño 2020.



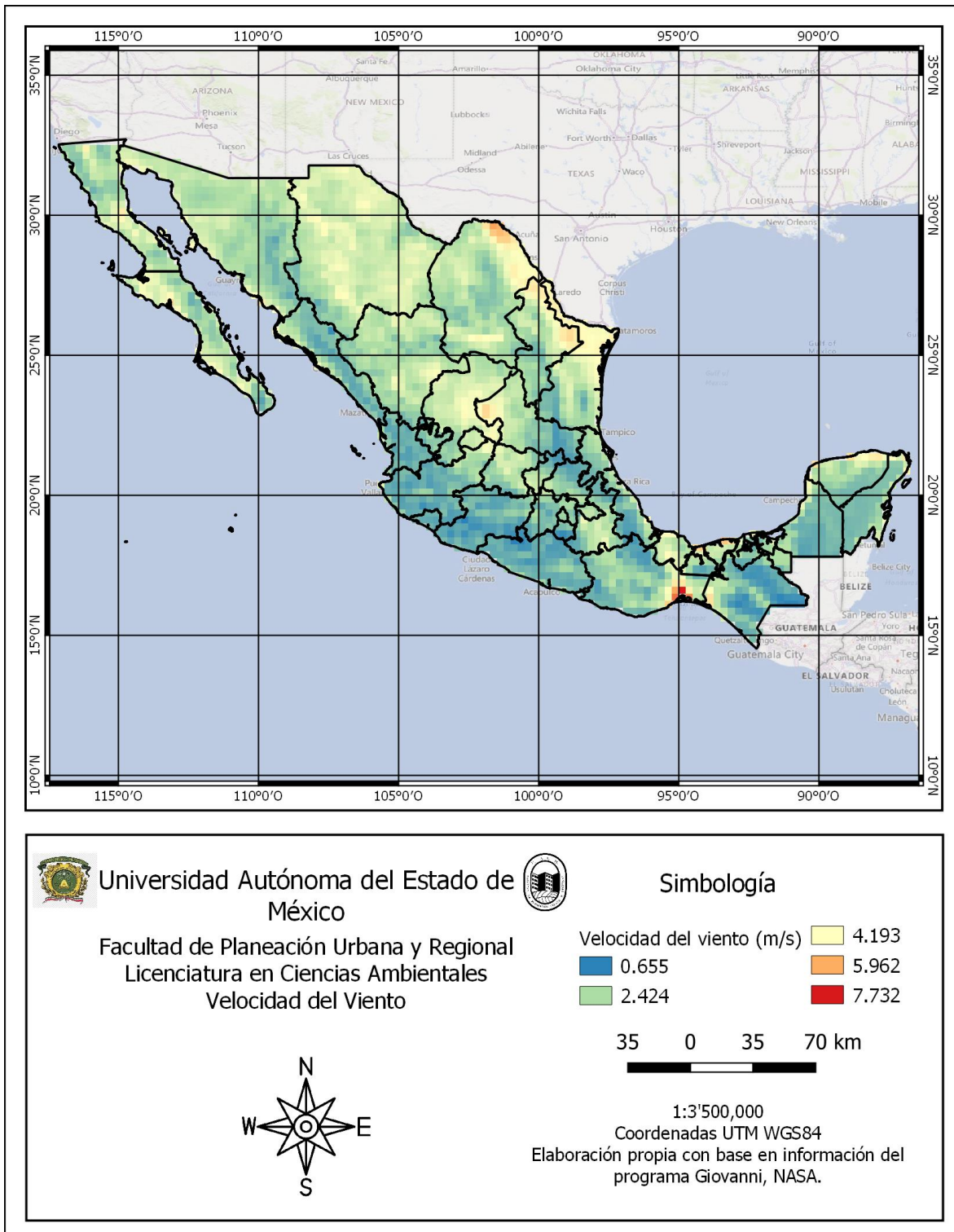
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.33 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), otoño 2020.



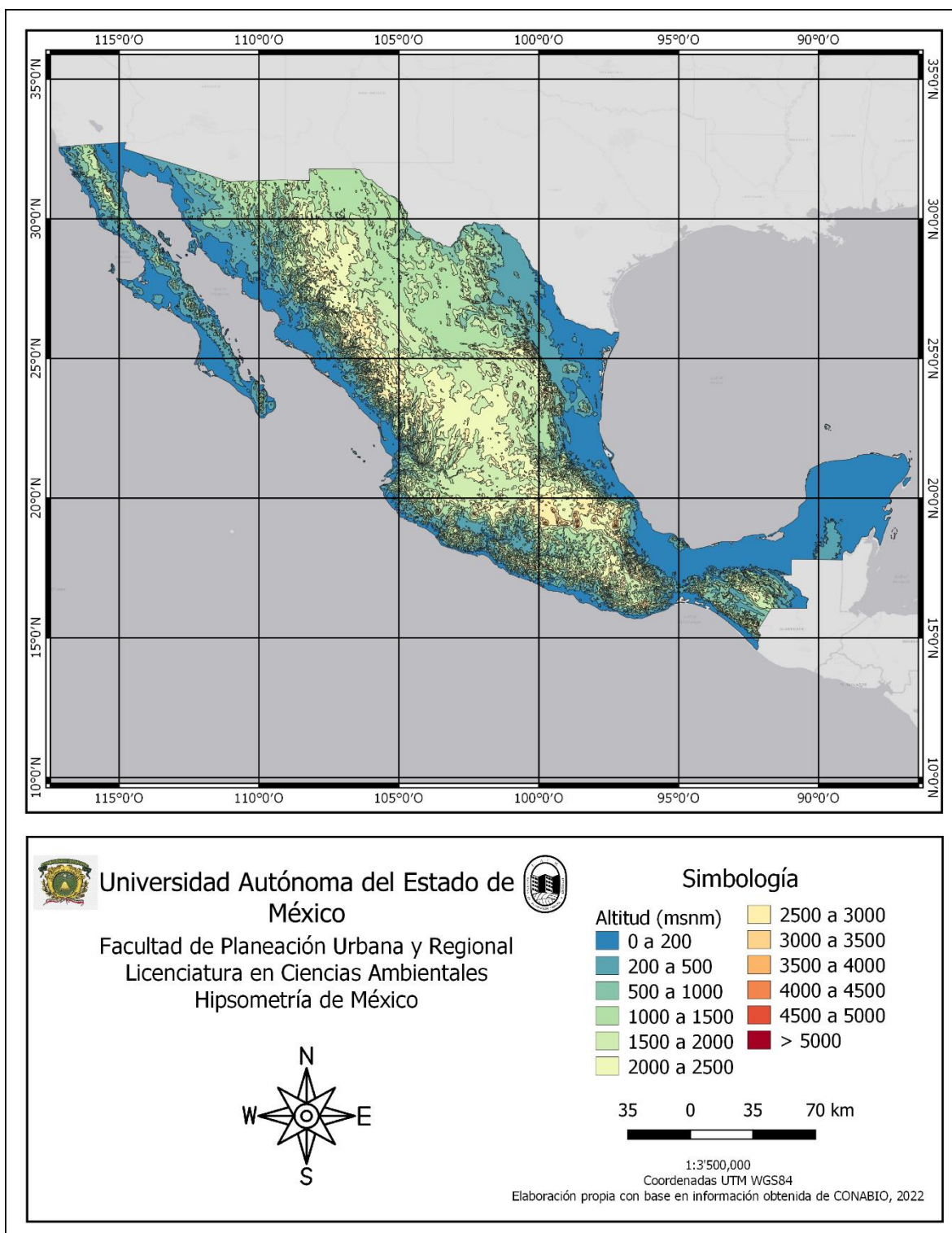
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.34 Velocidad del viento en m/s, otoño 2020.



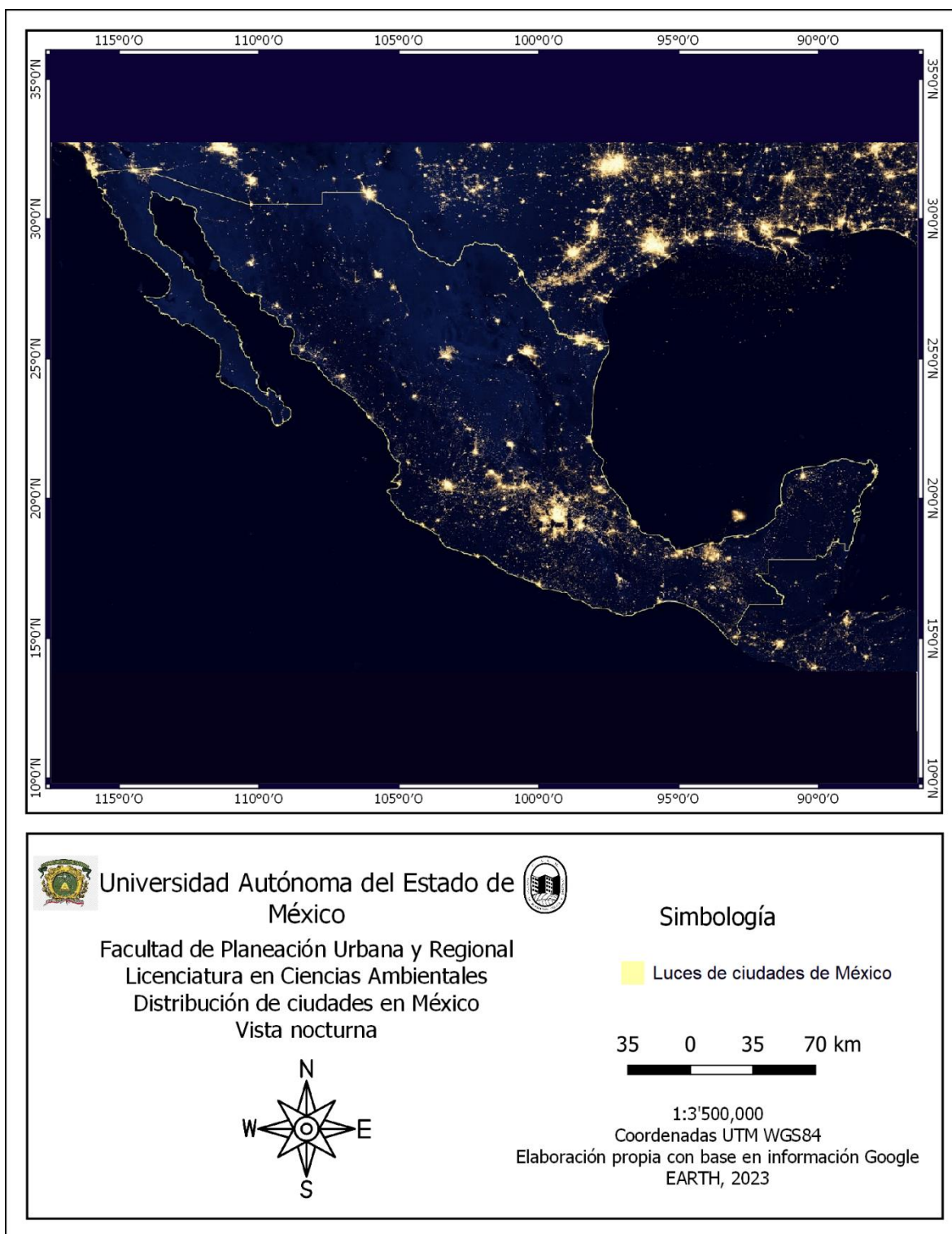
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.35 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.36 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.7 Invierno 2020

Respecto a la información obtenida para el invierno 2020, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y otros tres que describen variables que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso del invierno 2020, el día tomado como referencia es el 05 de febrero, en un horario de 16:00 a 18:00 h para todos los contaminantes y variables. Es apreciable que, en todos los casos, las zonas más afectadas del país son las zonas oriente, occidente, noroeste y sureste. Para el resto del país, existen concentraciones, aunque en menor cantidad.

5.7.1 Monóxido de carbono (CO)

Durante el invierno 2020 y de acuerdo con el mapa 5.37, se observan niveles significativos de monóxido de carbono en la parte sureste y occidente del país, específicamente en los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tabasco y Campeche, donde los valores registrados van desde los 0.05 a los 0.1 mol/m^2 . Asimismo, hay estados como Tamaulipas y Yucatán, que registran concentraciones que rondan los 0.04 mol/m^2 . Para el resto de la república, la estimación no sobrepasa los 0.02 mol/m^2 .

5.7.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Respecto al dióxido de nitrógeno y tomando como referencia el mapa 5.38, los niveles máximos de concentración, se registran en las zonas sureste, centro, occidente y noroeste del país, en estados como Campeche, Tabasco, Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Colima, Guanajuato, Aguascalientes, Nayarit, Hidalgo, Nuevo León, Coahuila, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, Durango, Baja California y Baja California Sur; en estos estados, las concentraciones de NO_2 , se encontraron entre los 3E^{-5} y los 1.1E^{-4} mol/m^2 , mientras que, en el resto del país, no se superan valores de 2.5E^{-5} mol/m^2 . Es importante destacar este año como uno de los que mayor dispersión de NO_2 tuvo, en comparación con los demás analizados.

5.7.3 Dióxido de azufre (SO_2)

La información presentada para el dióxido de azufre revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los 1.3E^{-5} mol/m^2 , sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana.

Durante el invierno 2020, el viento alcanzó velocidades de 5.575 m/s en las regiones noreste y noroeste del país, esto, en parte, podría explicar la disminución de contaminantes en estados como Durango, Zacatecas, Coahuila y Nuevo León.

De acuerdo con el mapa 5.41, la hipsometría en México no representa un factor determinante en la presencia de contaminantes, esto podemos apreciarlo

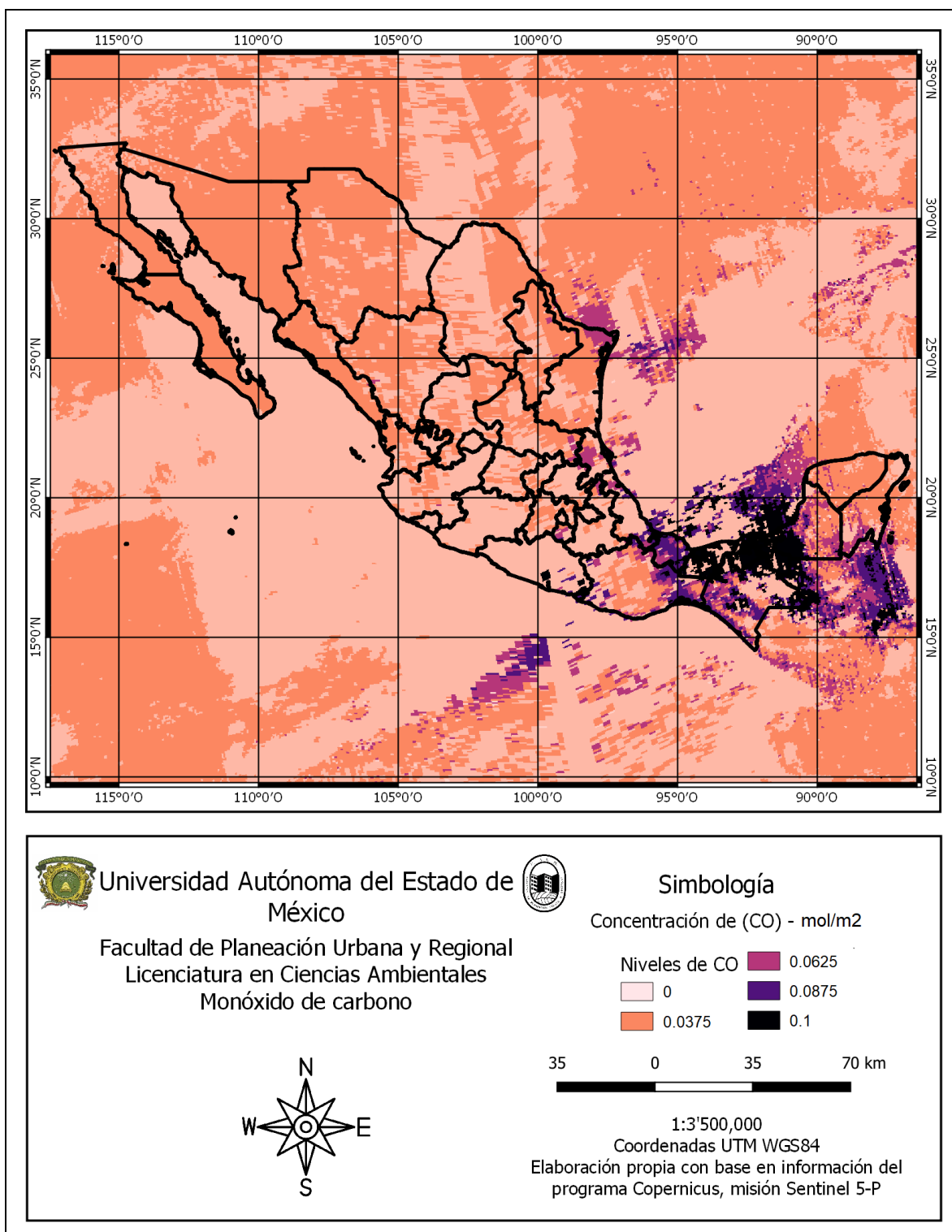
principalmente en la región orográfica conocida como Sierra Madre Occidental, donde las concentraciones de contaminantes son significativas.

En cuanto a la distribución de ciudades, parece que existe cierta relación en cuanto a la concentración de contaminantes, principalmente en la zona centro, tal como lo muestra el mapa 5.42

Nota: Cuadro de identificación de mapas

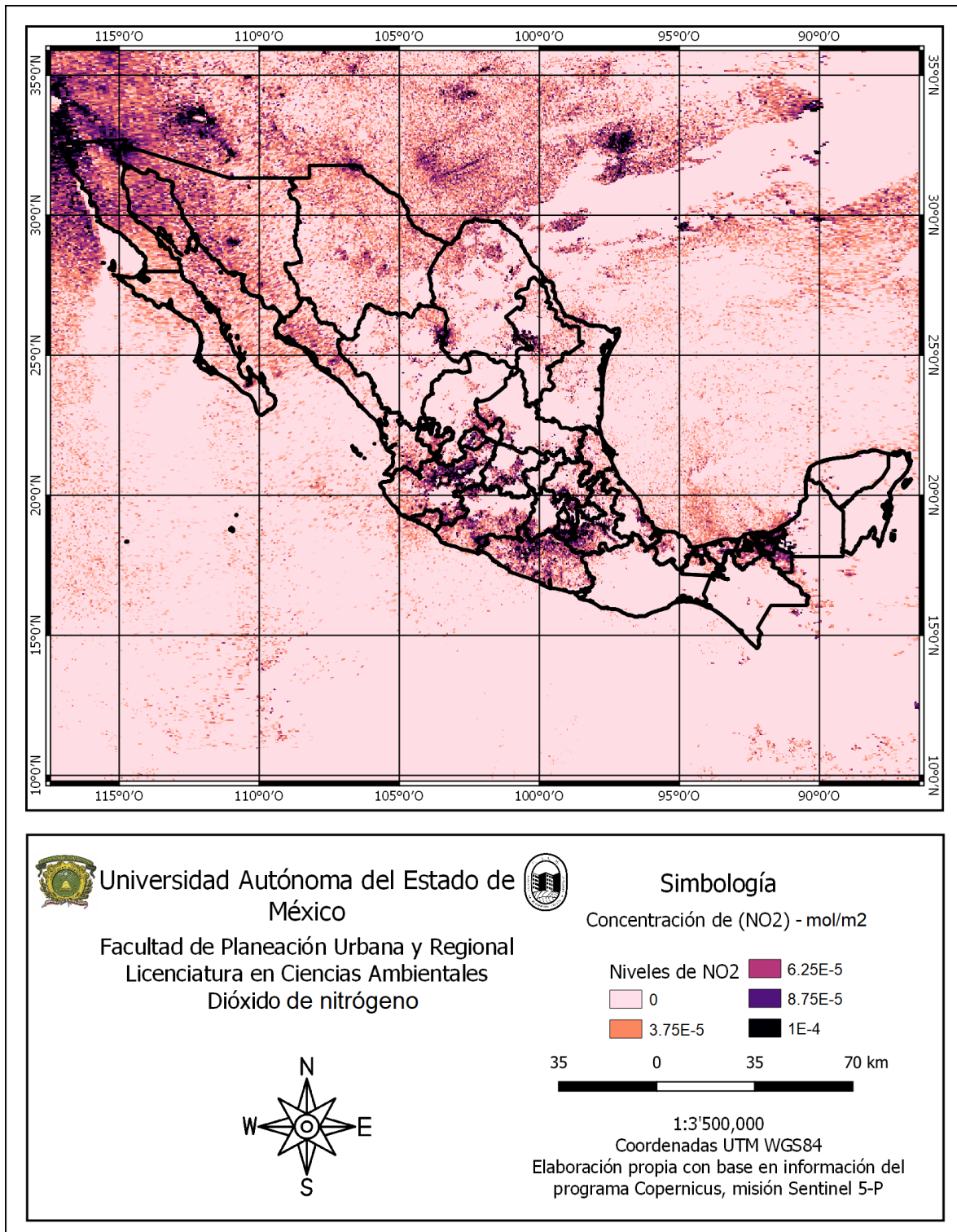
Nº de mapa	Descripción
5.37	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.38	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.39	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.40	Velocidad del viento
5.41	Hipsometría de México
5.42	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.37 Concentración de monóxido de carbono (CO), invierno 2020.



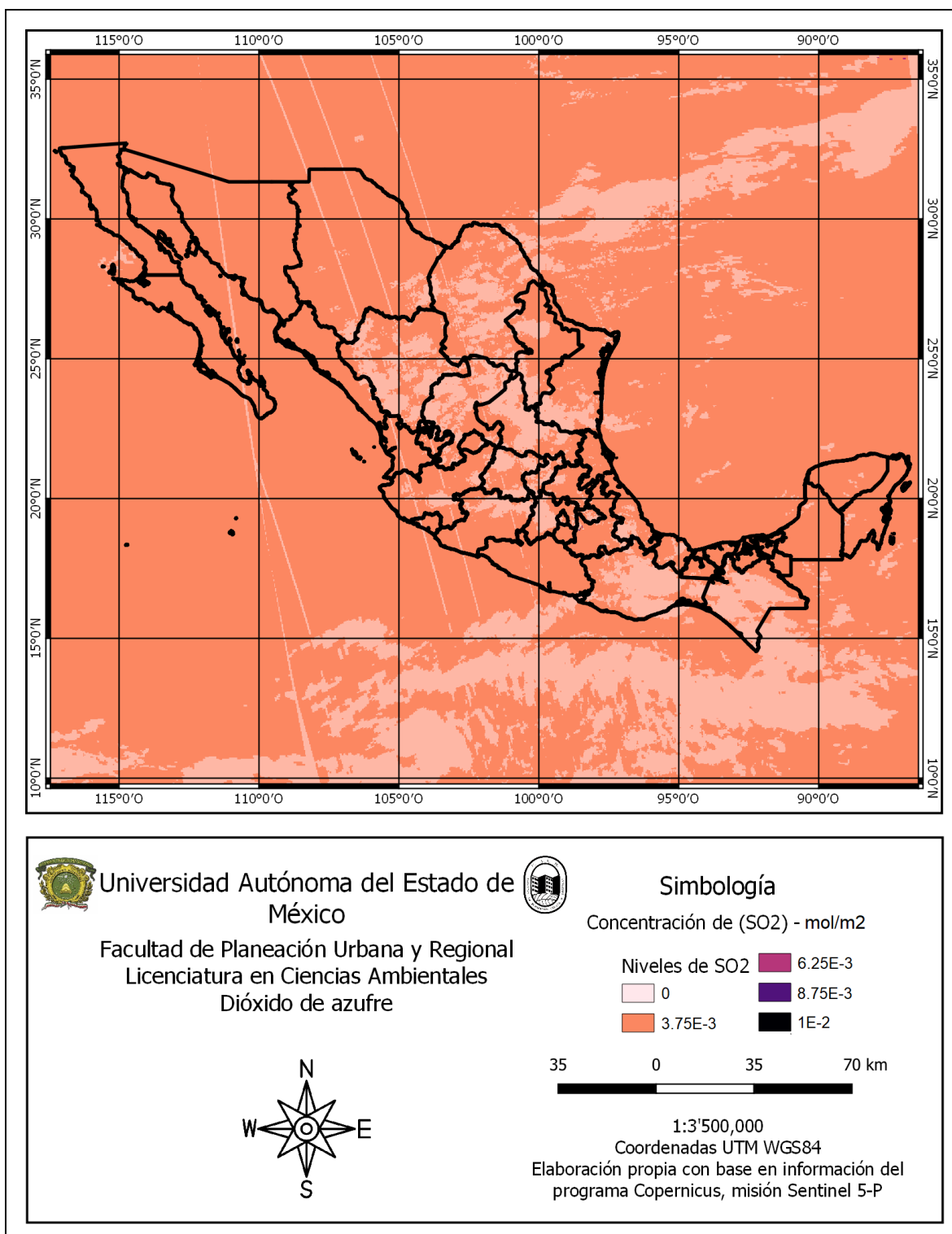
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.38 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), invierno 2020.



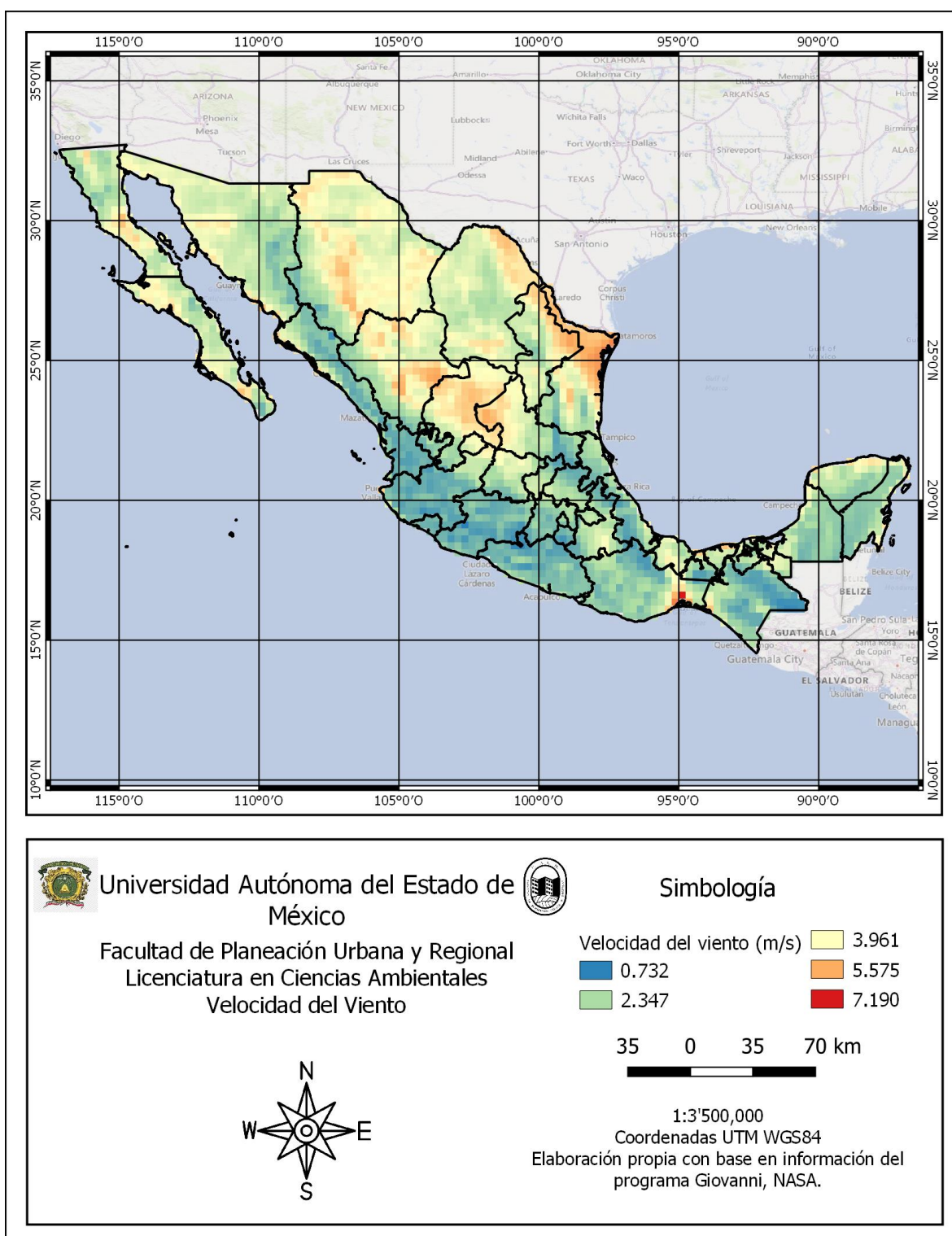
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.39 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), invierno 2020.



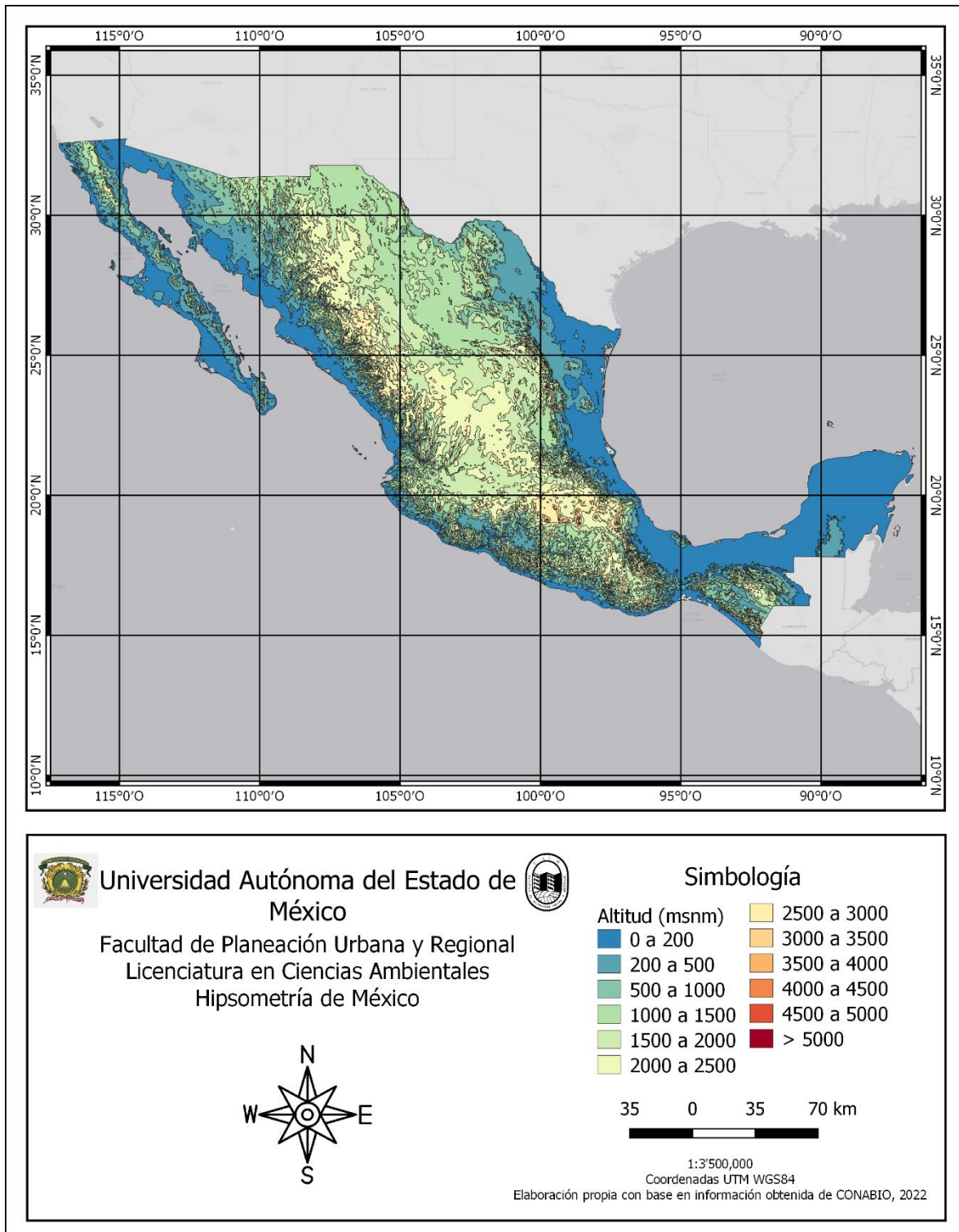
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.40 Velocidad del viento en m/s, invierno 2020.



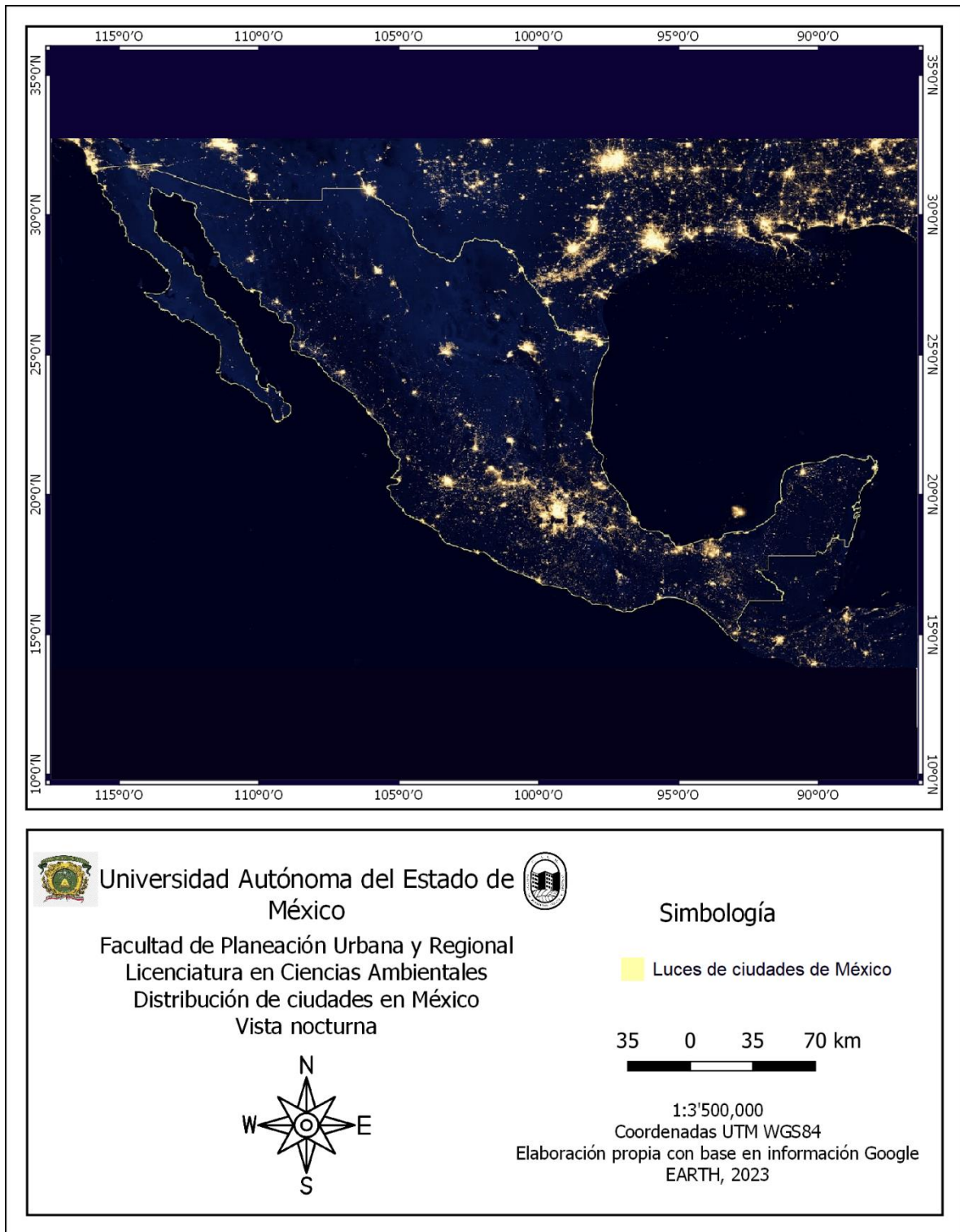
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.41 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.42 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

5.8 Invierno 2021

Respecto a la información obtenida para el invierno 2019, se muestran tres mapas correspondientes a contaminantes criterio (CO , NO_2 y SO_2) y, otros tres que describen factores que inciden en el comportamiento de dichos contaminantes (velocidad del viento, orografía y distribución de ciudades). Para el caso del invierno 2019, el día tomado como referencia fue el 05 de febrero, en un horario dentro de las 16:00 a las 18:00 h para todos los contaminantes y variables. Es apreciable que, en todos los casos, las zonas más afectadas del país son la zona centro y sur, mientras que, en la zona norte, no se visualizan afectaciones significativas. A continuación, se describe un análisis de cada contaminante.

5.8.1 Monóxido de carbono (CO)

Durante el invierno 2019 y de acuerdo con el mapa 5.43, se observa una dispersión significativa de monóxido de carbono en la parte sur del país, específicamente en los estados de Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Tabasco y Campeche. El valor mínimo registrado se encuentra en los 0.0125 mol/m^2 , mientras que el valor máximo corresponde a 0.1 mol/m^2 . Existen algunas zonas como el noreste de Tamaulipas, donde se aprecian concentraciones de contaminantes que rondan los 0.06 mol/m^2 , a partir de ahí, el resto del país (zona norte y occidente) se encuentra por debajo de los 0.025 mol/m^2 .

5.8.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

En lo relativo al dióxido de nitrógeno y tomando como referencia el mapa 5.44, las concentraciones máximas se registran en la zona centro del país, en estados como Michoacán, Guerrero, Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Guanajuato, Veracruz, San Luis Potosí y la CDMX. Los niveles mínimos registrados rondan los $1.25\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, mientras que la máxima apreciable ronda los $9\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$. En la zona sur del país, existen concentraciones que se encuentran entre los 2.5 y 6.5 mol/m^2 , del mismo modo, la ciudad de Mexicali, Baja California y el estado de Durango, presentan valores similares. El área restante del país no supera valores de 2.5 mol/m^2 .

5.8.3 Dióxido de azufre (SO_2)

La información presentada para el dióxido de azufre revela que los niveles de concentración se encuentran entre los 0.001 y los $1.3\text{E}^{-5} \text{ mol/m}^2$, sin embargo, dicha concentración se muestra uniforme en la mayor parte de la República Mexicana.

Las concentraciones descritas en los párrafos anteriores podrían encontrar su explicación en una serie de diversos factores; el más importante es el referente a la velocidad del viento; en el mapa 5.45 se aprecia dicho comportamiento durante el invierno 2019, donde la velocidad mínima registrada en el país es equivalente a los $.835 \text{ m/s}$, mientras que la máxima alcanzó los 7.388 m/s .

Es importante destacar que, aquellas zonas del país donde se registraron las concentraciones más bajas de contaminantes coinciden con aquellas zonas donde se registraron velocidades del viento mayores; por el contrario, aquellas zonas con mayores concentraciones de contaminantes, coinciden con el área ocupada por velocidades de viento más bajas. Esto, en principio, por la acción dispersora que tiene el viento sobre las diversas partículas disueltas en la atmósfera.

Un segundo factor a considerar es la composición orográfica del país, ya que esta influye significativamente en el comportamiento, velocidad y dirección del viento, mismo que, como se mencionó anteriormente, es un factor determinante en la distribución de contaminantes en la atmósfera.

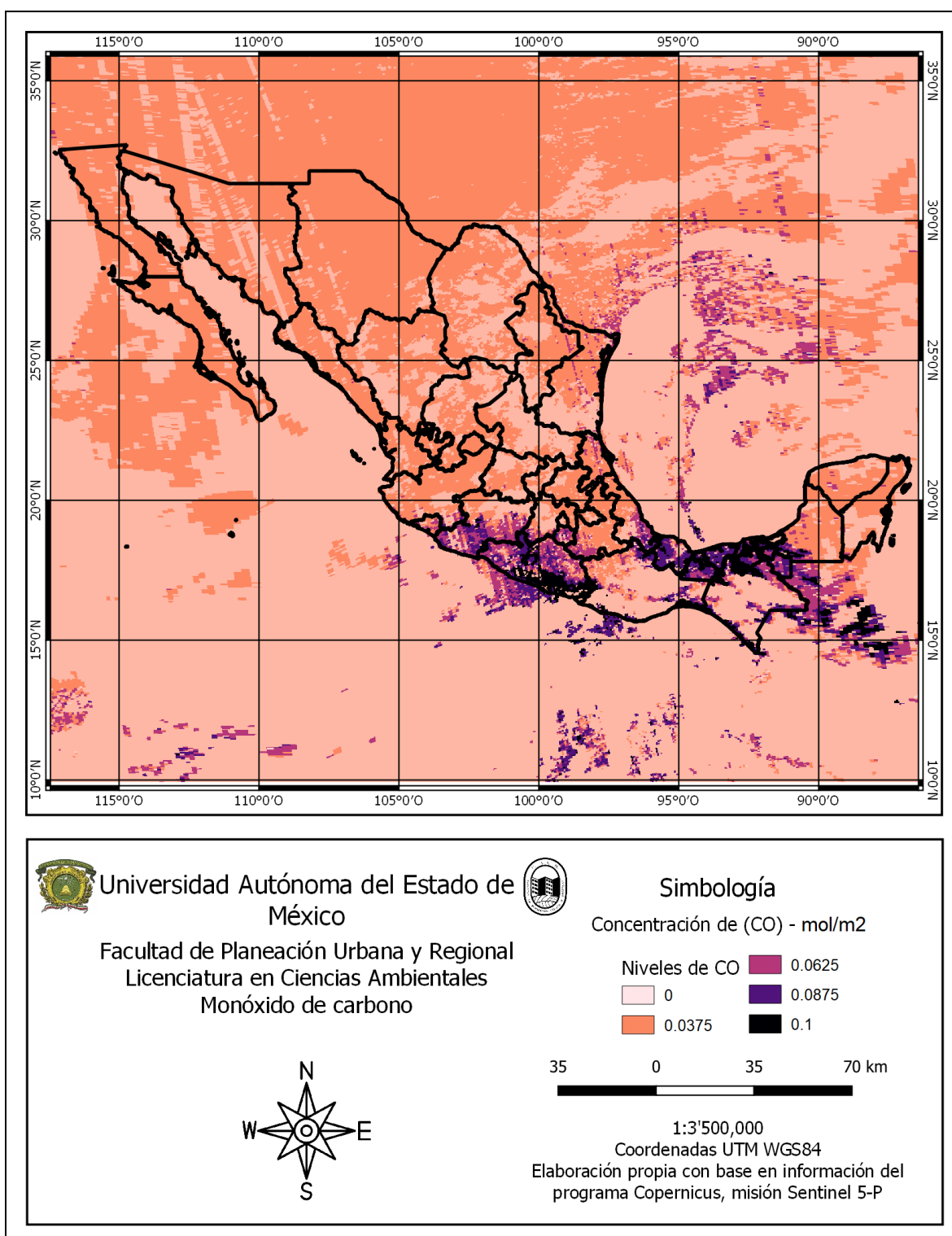
Como último factor, se consideró la distribución de las ciudades a lo largo del territorio, misma que, aunque es un factor determinante en la emisión de contaminantes, no parece ser un factor de importancia significativa para la distribución y comportamiento atmosférico de los mismos.

Con lo anterior, podemos inferir que, durante el invierno 2019, las concentraciones de contaminantes fueron significativamente mayores que las concentraciones de años posteriores. Del mismo modo, la velocidad del viento y la composición orográfica, actúan como agentes dispersores.

Nota: Cuadro de identificación de mapas

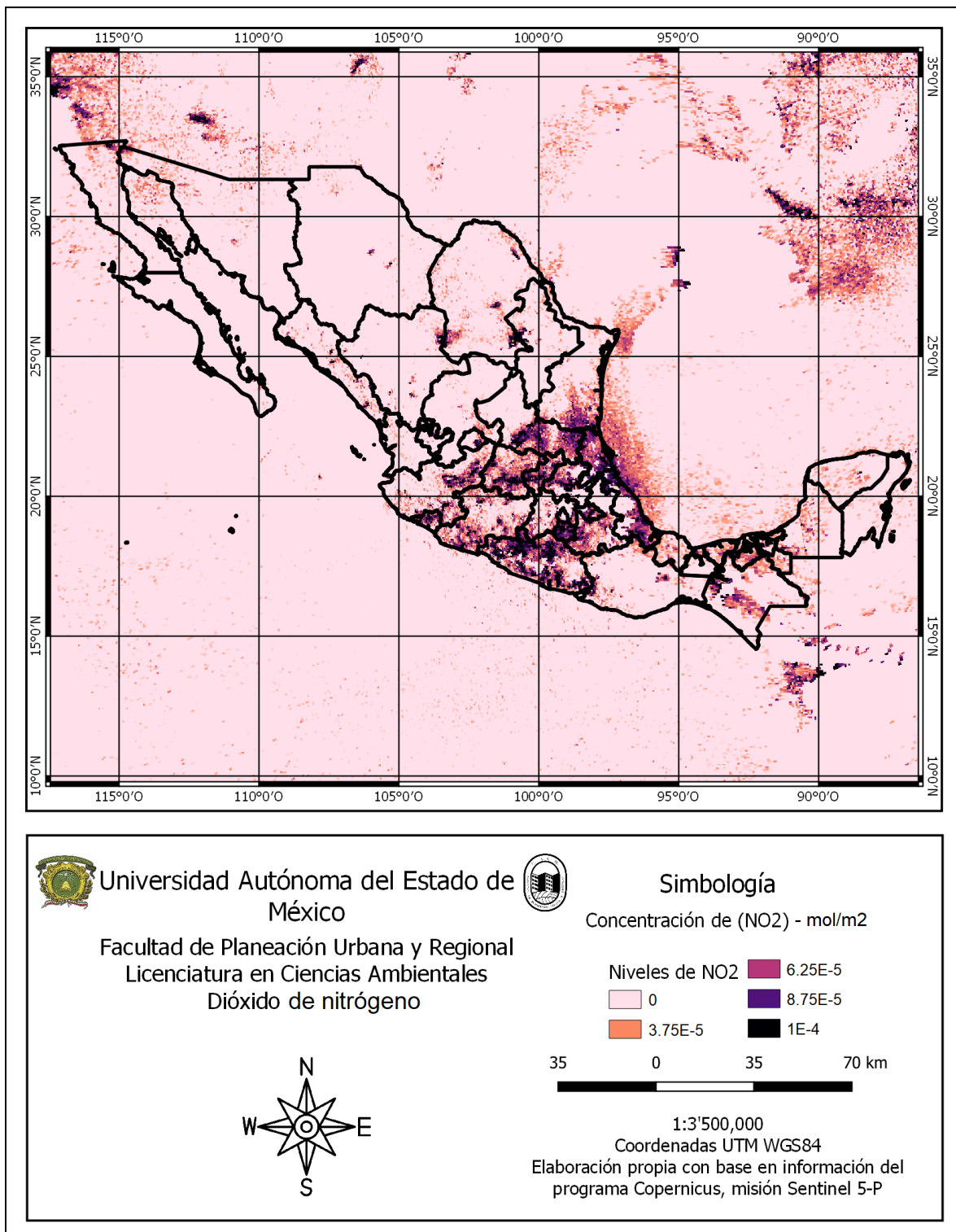
Nº de mapa	Descripción
5.43	Concentración de monóxido de carbono (CO)
5.44	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO ₂)
5.45	Concentración de dióxido de azufre (SO ₂)
5.46	Velocidad del viento
5.47	Hipsometría de México
5.48	Distribución de ciudades de México

Mapa 5.43 Concentración de monóxido de carbono (CO), invierno 2021.



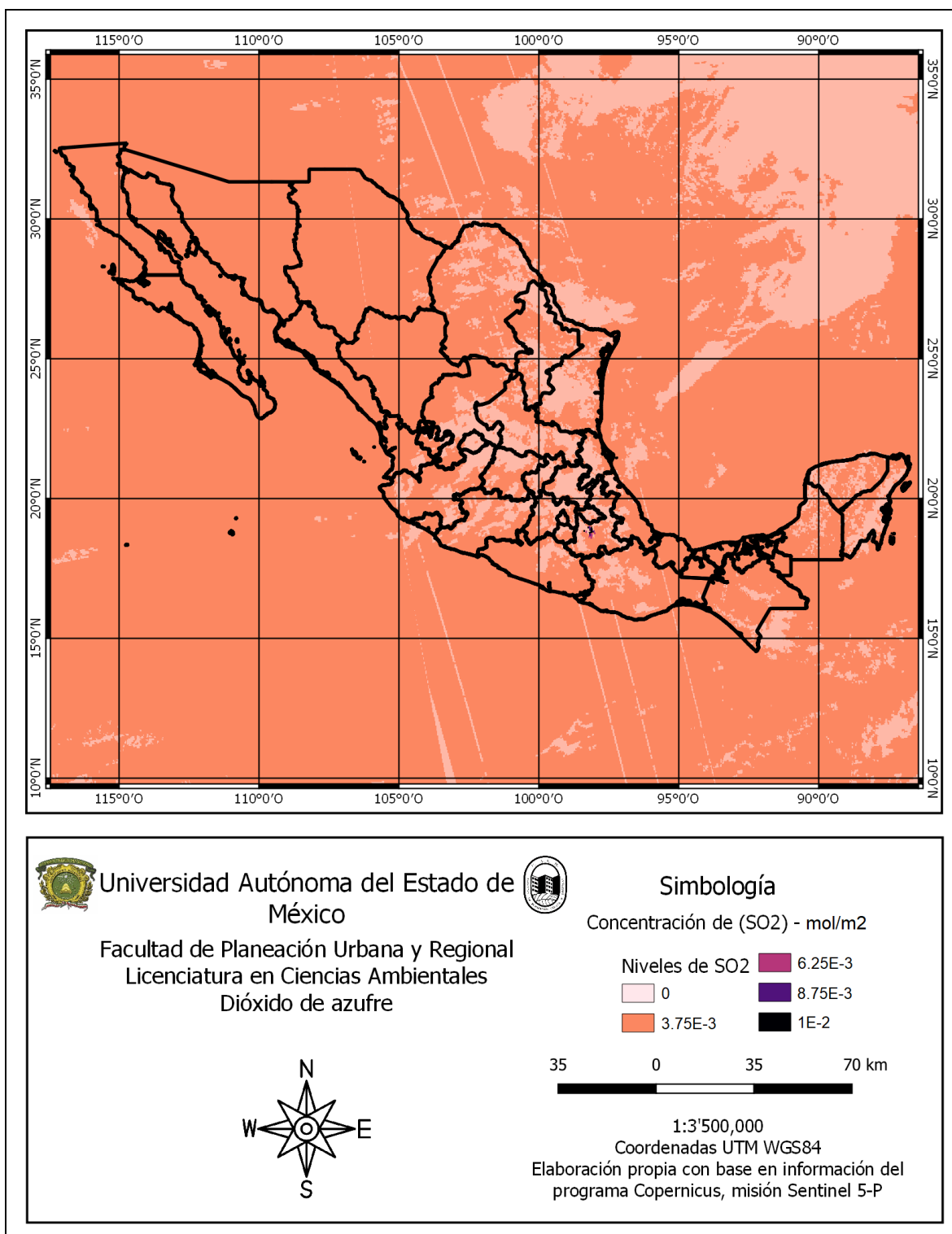
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.44 Concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), invierno 2021.



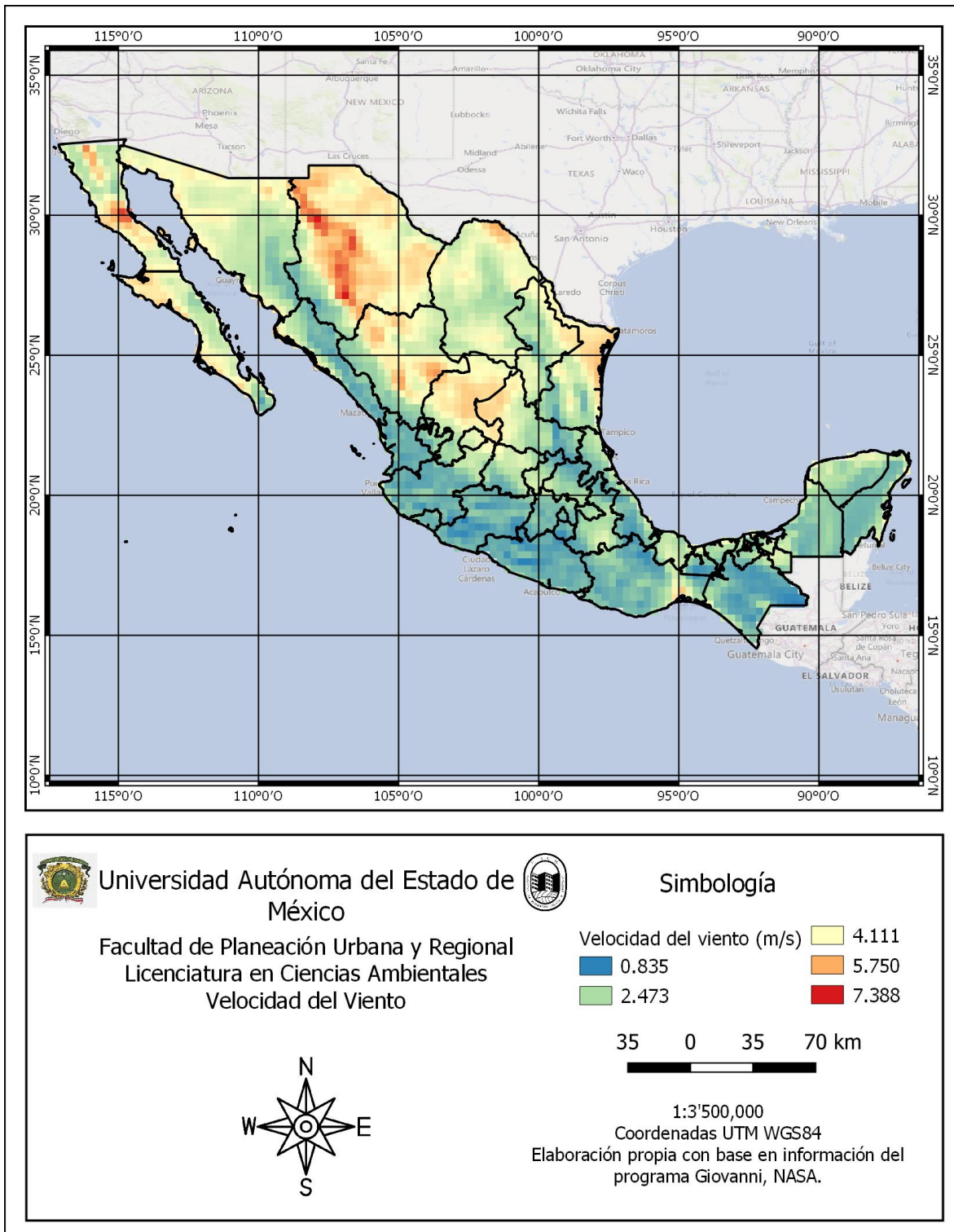
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.45 Concentración de dióxido de azufre (SO₂), invierno 2021.



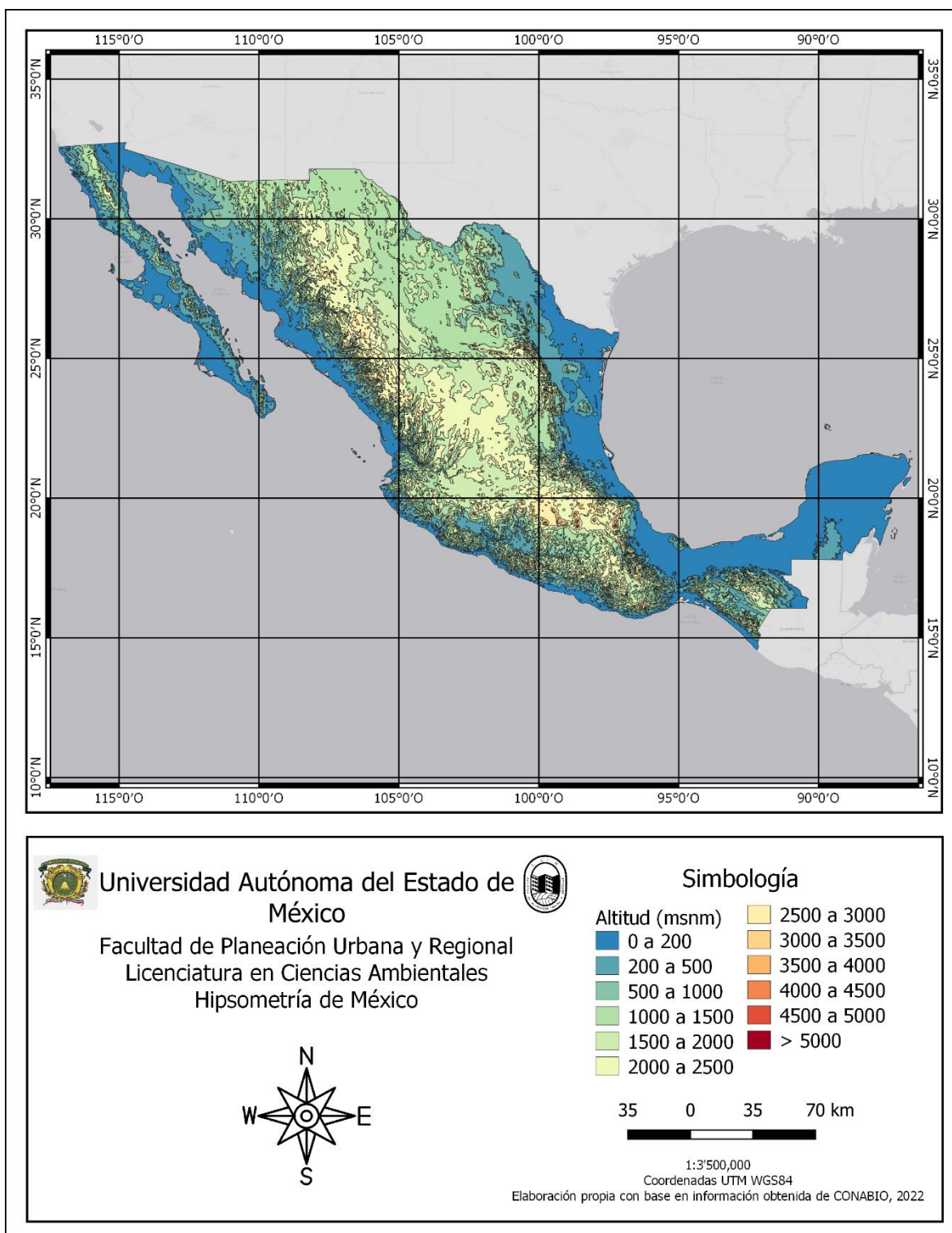
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 5P, 2022

Mapa 5.46 Velocidad del viento en m/s, invierno 2021.



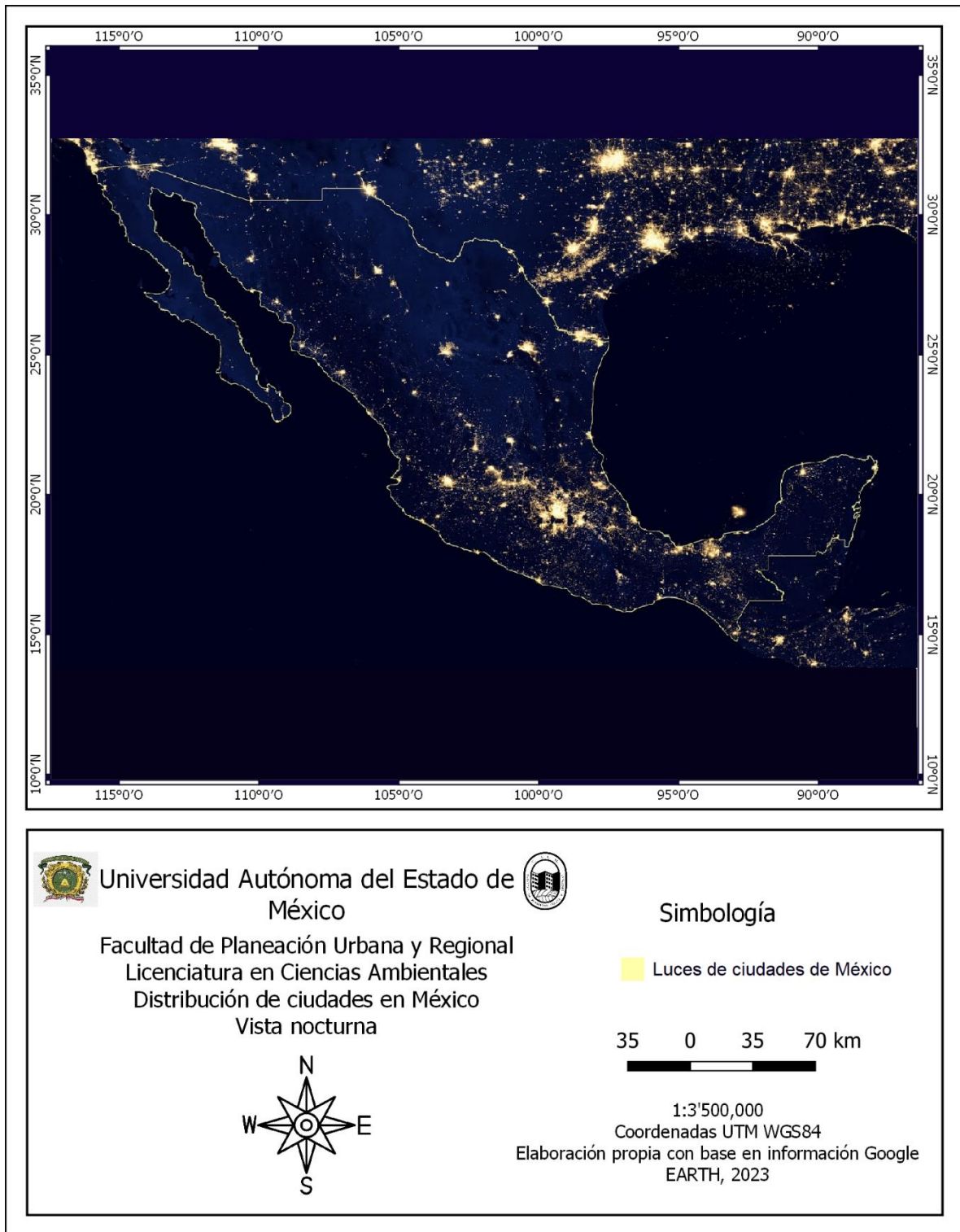
Fuente: elaboración propia con base en Giovanni, NASA, 2022.

Mapa 5.47 Hipsometría de México



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2022.

Mapa 5.48 Distribución de ciudades de México



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth, 2023

6.- Conclusiones

En la presente investigación se llevó a cabo el análisis de contaminantes criterio en la República Mexicana. Dicha información fue capturada por el sensor TROPOMI, a bordo del satélite Sentinel-5P. De esta forma, se logra cumplir el objetivo planteado al principio de la investigación, en el cual se analiza la variabilidad de las concentraciones de contaminantes atmosféricos a partir de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma EO BROWSER, en la República Mexicana, durante el periodo estacional primavera 2019 - invierno 2021. A su vez, dichas concentraciones fueron relacionadas con la velocidad del viento, la composición orográfica del país y la distribución de ciudades, esto con el fin de establecer cierto grado de influencia de dichos factores con el comportamiento y dispersión de partículas en la atmósfera.

Con base en la información presentada, se obtuvieron en primer lugar los distintos antecedentes relativos al análisis de contaminantes atmosféricos mediante imágenes satelitales, haciendo énfasis en aquellas que tuvieron como base, las imágenes capturadas por el satélite Sentinel-5P, sin embargo, dichos estudios también se remontan a colecciones LANDSAT, MODIS, GOES8, etc. De esta forma, es preciso concluir que las concentraciones y dispersión de contaminantes criterio, varían de acuerdo a la temporalidad y los factores meteorológicos y fisiográficos, debido a que, en algunas zonas del país, dichos factores también son variables y modifican su grado de influencia de acuerdo a la misma temporalidad; lo anterior se puede ver reflejado en los distintos mapas contenidos en el capítulo “Resultados y Observaciones”.

Las imágenes satelitales de contaminantes criterio, fueron obtenidas de la plataforma EO BROWSER y trabajadas mediante el software QGIS, obteniendo un compilado de cartografía temática. Para el caso de los tres contaminantes analizados, la temporalidad se estableció de acuerdo a las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), además, los días designados para cada estación corresponden al 05 de mayo, 05 de agosto y 05 de noviembre (para el año 2019), 05 de febrero, 05 de mayo, 05 de agosto y 05 de noviembre (para el año 2020) y solo el 05 de febrero para el año 2021. Con dicha información, fue posible analizar las concentraciones y dispersión para cada uno de los contaminantes criterio analizados (monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre)

Un primer resultado revela que, el dióxido de nitrógeno, fue el contaminante que presentó comportamientos más radicales en cuanto a su concentración y dispersión, ya que de la primavera 2019 al invierno 2021, se aprecia cierto grado de variabilidad en cuanto a su distribución por la República, sin embargo, también es apreciable que las zonas centro y norte, fueron las más afectadas por dicho contaminante.

El monóxido de carbono tuvo una incidencia significativa durante el invierno 2020 y 2021, respecto a otras temporalidades; asimismo, las concentraciones afectaron en mayor medida las zonas centro, oriente y sur del país.

El dióxido de azufre, fue el único contaminante que, de acuerdo con la información obtenida de EO BROWSER, no presentó variaciones significativas en ninguno de los tres años, sin embargo, es importante destacar que dichas concentraciones se mantuvieron constantes desde la primavera 2019 hasta el invierno 2021.

Basándonos en la información obtenida para los factores de dispersión, se concluye que, la velocidad del viento es el que presenta una influencia más significativa, ya que en la comparativa de mapas, se aprecian coincidencias entre aquellas zonas donde se registran velocidades de viento más altas y aquellas zonas con menores concentraciones de contaminantes; un claro ejemplo, son las zonas noreste y noroeste, siendo las regiones donde se registran las velocidades más altas durante todo el año y a su vez, las regiones donde se tienen menores concentraciones de contaminantes, principalmente en el invierno 2020 y 2021.

La composición orográfica del país también se consideró como un factor importante, sin embargo, este no influye directamente en la concentración y dispersión de contaminantes, pero sí es un factor que repercute significativamente en el comportamiento del viento en México, lo que conlleva una modificación en el comportamiento de las partículas disueltas en el aire.

En contraste con la distribución de ciudades, abordamos un factor que no influye directamente en la dispersión de contaminantes, sin embargo, sí es un factor determinante en la emisión de los mismos; dentro del compilado cartográfico del capítulo cinco, podemos apreciar cierta relación en cuanto a la presencia de contaminantes en aquellas zonas que muestran una mayor concentración poblacional, tal es el caso de las regiones centro y noreste del país, sin embargo, también se destacan puntos específicos con altas concentraciones, esto en ciudades como Tijuana y Mexicali.

Con los resultados obtenidos, se espera que la presente investigación sea de utilidad para diversos sectores poblacionales y futuras investigaciones, asimismo, que permita ofrecer un panorama más completo y gráfico de la situación actual en materia de contaminación atmosférica y de los diversos factores que pueden tener influencia en su comportamiento. Del mismo modo, resulta importante precisar las consecuencias que dichos contaminantes puedan tener en los diversos ámbitos o sectores, pero fundamentalmente, en la adecuación y correcta aplicación de leyes, normas y reglamentos que permitan una regulación eficiente en la emisión de sustancias nocivas para el ambiente.

Por último, se resalta la importancia en el uso de sistemas de información geográfica (SIG), para un análisis espacial eficiente, mismos que puedan facilitar la comprensión de patrones, relaciones y tendencias en áreas geográficas específicas, además de aportar significativamente a la toma de decisiones en áreas como el urbanismo, transporte, salud y economía; lo anterior, no solo en materia de contaminación atmosférica, sino también, aquellos que pueden aportar información para el estudio de las grandes esferas ambientales.

7. Recomendaciones

La presente investigación tiene como propósito, realizar un aporte a futuras investigaciones en materia de análisis de la contaminación atmosférica mediante imágenes satelitales, abordando diferentes variables y factores. Con lo anterior, se proponen las siguientes recomendaciones:

- En futuras investigaciones, similares o con información obtenida de otro tipo de satélites, se ofrece la posibilidad de enriquecer el tema de investigación con otros factores de comparación, como pueden ser: dirección del viento, precipitación, humedad, entre otras.
- El análisis de la contaminación atmosférica también puede vincularse de forma más directa a otros sectores como la salud, la economía, la dinámica poblacional, etc. Buscando ofrecer un enfoque integral con las distintas áreas del conocimiento que resulten afines para la investigación.
- Por último, resulta importante llevar a cabo la difusión para el aprendizaje y manejo de los sistemas de información geográfica como herramienta indispensable para el análisis de fenómenos sociales y medioambientales, ya que estos, ofrecen facilidades para la interpretación, análisis y relación de variables espaciales.

Bibliografía

- AEMeT. (2022). *Elementos y factores del clima. Tipos de climas*. Recuperado el 2023, de <http://meteo.navarra.es/definiciones/elementosfactores.cfm#top>
- Aires, F. B. (2012). El ozono estratosférico. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/535/53559383005.pdf>
- Arboleda Guerrero, Á. S., & Vásquez Taco, J. D. (2021). *Evaluación de datos satelitales del sensor de calidad de aire TROPOMI - SENTINEL 5P para el Ecuador entre los años 2018 a 2020*. Quito. Recuperado el 2021, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20893/1/UPS%20-%20TTS505.pdf>
- Arboleda Lozada, K. L., & Neto Jiménez, A. N. (2021). *MODELOS PARAMETRIZADOS DE CALIDAD DE AIRE EN BASE A SENSORES REMOTOS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO ENTRE LOS AÑOS 2016 AL 2019*. Quito. Recuperado el 2021, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19929/1/UPS%20-%20TTS301.pdf>
- Arellano Hernández, E. J. (2011). *Evaluación de aerosoles troposféricos del AMCM por medio de imágenes de satélite GOES*. Ciudad de México. Recuperado el 2021, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27265/Edgar%20Josue%20Arellano%20Hernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bigdeli, M., Taheri, M., & Mohammadian, A. (2021). Spatial sensitivity analysis of COVID-19 infections concerning the satellite-based four air pollutants levels. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Recuperado el 2021, de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13762-020-03112-1>
- Briz Pacheco, S. (2004). *Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante espectrorradiometría FTIR*. Madrid. Recuperado el 2021, de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/4521/>
- Carbajal Benítez, G., & Terán Cuevas, Á. (2002). MONITOREO Y ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO, CON IMÁGENES DEL SATELITE METEOROLÓGICO GOES8. *OMMAC XII CONGRESO NACIONAL DE METEOROLOGÍA*. Cancún. Recuperado el 2021, de https://www.researchgate.net/publication/264274910_MONITOREO_Y_ANALISIS_DE_LA_CONTAMINACION_EN_LA_CIUADAD_DE_MEXICO_CON_IMAGENES_DEL_SATELITE_METEOROLOGICO_GOES8
- CDMX, D. d. (2021). *IMECA: Índice METropolitano de la Calidad del Aire*. CDMX. Recuperado el 2021, de <https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>
- CEUPE. (2023). *¿Qué es la circulación atmosférica?* Centro Europeo de Postgrado. Recuperado el 2023, de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-circulacion-atmosferica.html#:~:text=La%20circulaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20es%20el,su%20funcionamiento%20b%C3%A1sico%20es%20constante.>

- CONABIO. (2022). *Portal de geoinformación*. Recuperado el 2022, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2021). *Estado del clima en México durante 2020 y perspectivas para 2021*. Recuperado el 2023, de <https://www.gob.mx/conagua/prensa/estado-del-clima-en-mexico-durante-2020-y-perspectivas-para-2021>
- Conde Williams, A. (2013). *Efectos nocivos de la contaminación ambiental sobre la embarazada*. La Habana. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/2232/223229324011.pdf>
- Contaminantes, R. E. (2007). *SOX (Óxidos de azufre)*. Recuperado el 2021, de <https://prtr-es.es/SOx-oxidos-de-azufre,15598,11,2007.html>
- Cruz Núñez , X., & Bulnes Aquino, E. (2019). Emission impact of wildfires: El Tepozteco 2016. *Atmósfera*. Recuperado el junio de 2021, de <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/ATM.2019.32.02.01/46637>
- DatosMundial. (2023). *El clima en México*. Recuperado el 2023, de <https://www.datosmundial.com/america/mexico/clima.php>
- Domínguez Arce, W. (2015). *Representación espacial por interpolación con KRIGING de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el año 2011*. Toluca. Recuperado el 2021, de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/49320/UAEM-FAPUR-TESIS-DOMINGUEZ%2cWENDY.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dutta, V., Kumar, S., & Dubey, D. (2021). *Recent advances in satellite mapping of global air quality: evidences during COVID-19 pandemic*. Recuperado el 2021, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s42398-021-00166-w>
- EPA. (2020). *Air pollution*. Recuperado el 2023, de <https://www.epa.vic.gov.au/for-community/environmental-information/air-quality/air-pollution#:~:text=Air%20pollution%20is%20when%20there%20are%20harmful%20levels,mainly%20come%20from%20industry%2C%20vehicles%20and%20wood%20burning.>
- EPA. (2020). *United States Enviromental Protection Agency*. Recuperado el 2023, de <https://www.epa.gov/sciencematters/tempo-new-era-air-quality-monitoring-space#:~:text=Satellites%20have%20become%20essential%20tools%20for%20tracking%20weather,movement%20of%20pollution%20in%20the%20air%20we%20breathe.>
- EPA. (2021). *Calidad del aire fronterizo*. Recuperado el 2021, de https://www3.epa.gov/ttnatc1/cica/airq_s.html
- ESA. (2020). *Sentinel-5*. Recuperado el 2022, de [https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p#:~:text=Copernicus%20Sentinel%2D5P%20is%20the,Monitoring%20Instrument%20\(TR OPOMI\)%20instrument.](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p#:~:text=Copernicus%20Sentinel%2D5P%20is%20the,Monitoring%20Instrument%20(TR OPOMI)%20instrument.)

- ESA. (2022). *TROPOMI*. Recuperado el febrero de 2023, de <http://www.tropomi.eu/data-products/methane>
- esa. (2023). *About SPOT Series*. Recuperado el 2023, de <https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot>
- ESA. (2023). *Navegador EO*. Recuperado el 2023, de https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=8&lat=42.65214&lng=11.82129&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fservices.sentinel-hub.com%2Fogc%2Fwms%2F2c5dc5f7-4c83-40dd-a520-da2c7221568d&datasetId=S5_AER_AI&fromTime=2023-04-05T00%3A00%3A
- ESA. (2023). *SNAP*. Recuperado el 2023, de <https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>
- ESRI. (2023). *¿Qué es ArcGIS?* Recuperado el 2023, de <https://www.sigsa.info/es-mx/arcgis/about-arcgis/overview>
- eurostat. (2014). *Glossary: Global-warming potential (GWP)*. Recuperado el 2023, de [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Global-warming_potential_\(GWP\)#:~:text=Global%2Dwarming%20potential%2C%20abbreviated%20as,those%20calculated%20over%20100%20years.](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Global-warming_potential_(GWP)#:~:text=Global%2Dwarming%20potential%2C%20abbreviated%20as,those%20calculated%20over%20100%20years.)
- Exteriores, S. d. (2020). *Acerca de México*. Obtenido de <https://embamex.sre.gob.mx/eua/index.php/es/enterate/391-acerca-de-mexico>
- Forero Castro, D. D. (2019). *Metodología para la incorporación de datos del sensor TROPOMI del satélite SENTINEL 5P al monitoreo de la calidad del aire en Bogotá*. Recuperado el 2021, de <file:///C:/Users/Admin/Downloads/ForeroCastroDiegoDaniel2019.pdf>
- Gálvez Serna, A. D., Angulo Cuero, J., González Duque, C., Aristizábal Zuluaga, B., & Velasco García, M. (2020). *Evolución de la calidad del aire en Manizales 2020, durante la cuarentena por Covid-19*. Manizales. Recuperado el 2021, de <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Bolet%C3%ADn%20extraordinario%20A%20Manizales%20II%20-%20Junio%202020-%20Evolucion%20de%20cuarentena%20por%20COVID-19.pdf>
- GVA. (2023). *LA ATMÓSFERA Y SUS CAPAS*. Recuperado el 2023, de <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-atmosfera-y-sus-capas>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. MCGRAW HILL. Recuperado el 2021, de <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). *Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO2 observations with ground-based measurements in Helsinki*. Recuperado el 2022, de <https://amt.copernicus.org/articles/13/205/2020/>
- IDEAM. (2022). *LA RADIACIÓN SOLAR Y SU PASO POR LA ATMÓSFERA*. Recuperado el marzo de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>

- IGECEM. (2015). *Datos e indicadores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Recuperado el 2021, de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2017/8/3/3a5b1d2fb9a55cea32564f562f9848aa.pdf
- INECC. (2022). *Gases y compuestos de efecto invernadero*. Recuperado el marzo de 2023, de <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- INEGI. (2019). *Comercio*. Recuperado el 2022, de <https://cuentame.inegi.org.mx/economia/terciario/comercio/default.aspx?tema=e>
- INEGI. (2019). *Construcción*. Recuperado el 2022, de <https://cuentame.inegi.org.mx/Economia/secundario/construccion/default.aspx?tema=e#:~:text=Construcci%C3%B3n,Cu%C3%A9ntame%20de%20M%C3%A9xico&text=Este%20sector%20es%20muy%20importante,escuelas%20y%20hospitales%2C%20entre%20otros.>
- INEGI. (2019). *Ganadería*. Recuperado el 2022, de <https://cuentame.inegi.org.mx/economia/primarias/gana/default.aspx?tema=e>
- INEGI. (2019). *Minería*. Recuperado el 2022, de <https://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=E#:~:text=En%202018%2C%20hay%203%2C123%20establecimientos,operaciones%20en%20pozos%2C%20entre%20otras.&text=Fuente%3A%20INEGI,Censos%20Econ%C3%B3micos.>
- INSST. (2018). *Dióxido de nitrógeno*. Recuperado el 2021, de <https://www.insst.es/documents/94886/431980/DLEP+116++Di%C3%B3xido+de+nitr%C3%B3geno++A%C3%B1o+2018.pdf/b295ec76-11fc-43fb-9834-31e8336d99bc?version=1.0&t=1551310405104#:~:text=Dependiendo%20de%20la%20temperatura%2C%20el,para%20dar%20nitratos%20y%20nitrit>
- IPCC. (2007). *¿Cómo contribuyen las actividades humanas a los cambios climáticos?* Recuperado el 2021, de https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html
- Jáuregui Ostos, E. (2003). Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones geográficas*. Recuperado el 2023, de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112003000100012
- Martínez Gutiérrez, J. (2018). *Contaminación Atmosférica*. La Habana: Universidad Tecnológica de la Habana. Recuperado el junio de 2021, de https://www.researchgate.net/publication/332230061_Contaminacion_atmosferica
- México, P. (2022). *¿Por qué México?* Recuperado el 2022, de <https://www.proyectosmexico.gob.mx/por-que-invertir-en-mexico/ubicacion-ideal/#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20una%20rep%C3%BAblica%20democr%C3%A1tica,encuentra%20definida%20en%20constituciones%20locales.>
- NASA. (2022). *NASA's Earth Observing System Project Science Office*. Recuperado el 2023, de <https://eosps.nasa.gov/content/nasas-earth-observing-system-project-science-office>

- NASA. (2023). *LANDSAT 8*. Recuperado el 2023, de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/#>
- OEHA. (2023). *PM2.5*. Recuperado el 2023, de <https://oeha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20PM%202.5%3F,grosor%20de%20un%20cabello%20humano.>
- OMS. (2021). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado el 2021, de http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=49AC12EB20F9FD6592EF49FE2B36C232?sequence=1
- OMS. (2022). *World Health Organization*. Recuperado el 2023, de [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Ortiz Solorio, C., & Gutiérrez Castorena, M. (2007). Estimación de la temperatura media mensual en México. *Geografía Agrícola*. Recuperado el 2023, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75703802>
- PRTR. (2022). *PARTÍCULAS PM10*. Recuperado el 2023, de <https://prtr-es.es/Particulas-PM10,15673,11,2007.html#:~:text=Las%20PM10%20se%20pueden,mil%C3%A9sima%20parte%20de%201%20mil%C3%ADmetro.>
- QGIS. (2023). *Guía de usuario de QGIS*. Recuperado el 2023, de https://docs.qgis.org/3.22/es/docs/user_manual/preamble/features.html
- Ramos Moreno , A. (2017). Modelamiento de material particulado emitido por coquización. Municipio de Samca, Bocayá. *Logos*. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/journal/5177/517752177014/517752177014.pdf>
- Rojas Benavente, N. (2014). *Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles producido por las fuentes naturales y antropogénicas a partir de las imágenes del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA & AQUA sobre américa del sur (2000-2012)*. Lima. Recuperado el 2021, de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4077/Rojas_bn.pdf?sequence=1
- Rojas Bracho, L., & Garibay Bravo , V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer. *Gaceta Ecológica*. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906902.pdf>
- Romero Placeres, M., Diego Olite , F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. Recuperado el junio de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008&lng=es&tlng=es
- Santana, J., Pérez , J., Rosete Fernando, Delgado , M., Linares, A., & Salas , E. (2017). *Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de*

curvas de nivel y la energía del relieve. Recuperado el 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112017000300005#:~:text=La%20evoluci%C3%B3n%20geotect%C3%B3nica%20ha%20determinado,litorales%2C%20estas%20%C3%BAltimas%20tanto%20en

Secretaría de Energía de Argentina. (2020). *CALIDAD DEL AIRE MEDIANTE TELEDETECCIÓN. DETERMINACIÓN Y MONITOREO ATMOSFÉRICO DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO NO2*. Secretaría de Energía, Ministerio de Desarrollo Productivo. Recuperado el 2021, de http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/energia_en_gral/mapas_emisiones_no2/met_no2_marzo.pdf

SEDEMA. (2023). *Índice AIRE Y SALUD*. Recuperado el 2023, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Zw==>

SEGOB. (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019*. Recuperado el 2022, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D022,la%20salud%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.

SEGOB. (2020). *PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-020-SSA1-2020*. Recuperado el 2022, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5601281&fecha=25/09/2020#:~:text=PROYECTO%20de%20Norma%20Oficial%20Mexicana,la%20salud%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.

SEGOB. (2021). *NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021*. Recuperado el 2022, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D021,la%20salud%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.

SEGOB. (2021). *NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021*. Recuperado el 2022, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D023,la%20salud%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.

SEMARNAT. (2011). *NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición*. Recuperado el 2021, de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4632/semarnat/semarnat.htm>

SEMARNAT. (2016). *Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México*. Ciudad de México. Recuperado el 2021, de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002516.pdf>

SEMARNAT. (2020). *Atlas digital geográfico*. Recuperado el 2022, de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html#:~:text=En%20el%20territorio%20nacional%20se,Fr%C3%ADdo%20con%20la%20m%C3%ADnima%20superficie.

- SEMARNAT. (2021). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA*. Recuperado el 2021, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
- SGM. (2017). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 2023, de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- SIAC. (2020). *Emisiones*. Recuperado el 2021, de <http://www.siac.gov.co/emisionesaire>
- SMADSOT. (2021). *Contaminación Atmosférica*. Obtenido de http://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/view_contaminacion.php
- SMN. (2023). *SIPROMAT*. Recuperado el 2023, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/modelos-de-pronostico-numerico/sipromat>
- Social, M. (2019). *Dinámica demográfica: un país que se mueve*. Recuperado el 2022, de <https://www.mexicosocial.org/dinamica-demografica-un-pais-que-se-mueve/>
- Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental. *Revista de Salud Pública*. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/422/42280110.pdf>
- Tello Cifuentes, L., & Díaz Paz, J. P. (2020). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de. *Tecnológicas*. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344264813006>
- TROPOMI. (2018). *Carbon Monoxide*. Recuperado el 2022, de <http://www.tropomi.eu/data-products/carbon-monoxide>
- UNIGIS. (2020). *Visualizar y descargar imágenes de satélite a través de EO Browser*. Recuperado el 2021, de <https://www.unigis.es/visualizar-y-descargar-imagenes-de-satelite-a-traves-de-eo-browser/>
- Vidal Daza, O. A., & Pérez Vidal, A. (2017). Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD. *Ingeniería*. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/journal/4988/498858053003/html/>