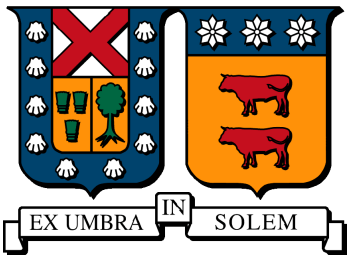
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE DATOS SATELITALES DE NO_2 TROPOSFÉRICO Y SUPERFICIAL PARA CHILE EN EL PERIODO 2018-2024

JOAQUÍN IGNACIO FERNÁNDEZ VERDUGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO OSSES
PROFESORA CORREFERENTE: DRA. ESTELA BLANCO

ENERO 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): X Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE DATOS SATELITALES DE NO2 TROPOSFÉRICO Y SUPERFICIAL PARA CHILE EN EL PERIODO 2018-2024

Nombre del candidato(a): Joaquín Ignacio Fernández Verdugo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Santiago San Joaquín **Departamento:** Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Osses Alvarado, en mi calidad de profesor guía del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

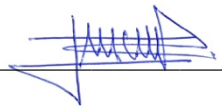
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22 de enero 2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21 de enero de 2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Índice general

1. Estado del arte 3
   1.1. Conceptos clave . . . 3
      1.1.1. El Dióxido de Nitrógeno (NO_2) . . . 3
      1.1.2. Definición y Conceptos Fundamentales de Teledetección . . . 14
   1.2. Satélites para la detección de datos medioambientales . . . 19
      1.2.1. El Programa de la NASA (EOS/ESO) . . . 21
      1.2.2. El Programa Copernicus EU . . . 24
      1.2.3. Contraste de Programas y Selección de Fuente de Datos . . . 26
   1.3. Estudios previos del Monitoreo Satelital de NO_2 superficial . . . 28

2. Metodología de trabajo y desarrollo de software 43
   2.1. Introducción al diseño experimental . . . 43
      2.1.1. Contexto de códigos existentes y selección de herramientas . . . 43
      2.1.2. Elaboración y descripción del código satelital . . . 44
   2.2. Lógica de Selección de Algoritmos y Funciones Adicionales . . . 46
      2.2.1. Diferenciación de Mosaicos: Día Puntual vs. Rango Temporal . . . 46
      2.2.2. Ingeniería de datos terrestres (SINCA) . . . 48
      2.2.3. Integración meteorológica: Reanálisis ERA5 . . . 51
      2.2.4. Interfaz de Usuario (GUI) y Visualización . . . 53
   2.3. Análisis y validación de resultados . . . 55
      2.3.1. Definición de las zonas de estudio . . . 55
      2.3.2. Metodología de validación estadística . . . 60
      2.3.3. Herramientas de análisis cuantitativo . . . 62

3. Resultados obtenidos, análisis y discusión 63
   3.1. Descarga de datos SentinelHub . . . 63
   3.2. Análisis de rendimiento del algoritmo de descarga . . . 67
   3.3. Información obtenida de los registros de concentración de NO_2 . . . 69
      3.3.1. TROPOMI: Columna troposférica de NO_2 . . . 69
   3.4. Contraste de registros de ambas fuentes . . . 70
      3.4.1. Análisis por Coeficiente de Pearson . . . 70
      3.4.2. Análisis por diagrama de dispersión . . . 74

3.4.3. Análisis por Diagramas de caja y bigote . . . 76
3.5. Discusión de resultados . . . 77
3.5.1. Valor agregado y representatividad de la muestra . . . 77
3.5.2. Validación de la metodología de transformación y correlación . . . 77
3.5.3. Eficiencia computacional y resolución temporal en datos validados . . . 78
3.5.4. Incidencia de la calidad de los datos: preliminares y no validados . . . 78
3.5.5. Factores ambientales y limitaciones de la detección . . . 78
3.5.6. Análisis de dispersión . . . 79
3.5.7. Conclusiones de la discusión . . . 79
3.6. Observaciones . . . 79

4. Conclusiones y recomendaciones 80
4.1. Conclusiones generales . . . 80
4.2. Cumplimiento de objetivos . . . 81
4.3. Recomendaciones . . . 82

A. Series temporales P90 %: columna troposférica $\left[\mathrm{mol/m^2}\right]$ 91

B. Estacionalidad en cantidad de datos 99

C. Series temporales para contraste de fuentes 103

D. Gráficos de dispersión para contraste de fuentes 108

E. Gráficos de caja y bigote para contraste de fuentes 111
E.1. Región de Antofagasta . . . 111
E.2. Región de Valparaíso . . . 113
E.3. Región Metropolitana de Santiago . . . 116
E.4. Región del Bíobio . . . 118

F. Mapas comparativos de fuentes de datos 121

Índice de figuras

1.1. Estructura química del NO_2 . . . 3
1.2. Productos del nitrógeno con su respectivo estado de oxidación [Bellavia et al., 2015]. . . . 4
1.3. Diagrama infográfico del Proceso de Oxidación y Reducción [udaix, 2017]. . . . 4
1.4. Vidas medias de NO_X ajustadas para las fuentes de emisión estudiadas en China y EE. UU. Los colores indican la duración de la vida útil en horas. Según este estudio, los valores típicos para la temporada de ozono (mayo-septiembre) son de $3,8 \pm 1,0$ horas, con un rango observado de 1,8 a 7,5 horas [Liu et al., 2016]. . . . 6
1.5. Isopletas de concentraciones de O_3 en función de NO_X y COV, mostrando los regímenes limitados por cada precursor [Parra, 2017]. . . . 8
1.6. Perfiles promedio diarios de O_3 en Cuenca (2013-2015). Se observa cómo las concentraciones en fines de semana (líneas de color) superan o igualan a las de días laborables (línea negra) durante las horas de mayor insolación [Parra, 2017]. . . . 8
1.7. Impacto visual de la deposición ácida en estructuras urbanas. Fuente: Adaptado de [Diario Digital Colombiano, 2015]. . . . 9
1.8. Secciones eficaces de absorción del NO_2 en la región de la banda ν_3. Comparación entre HITRAN2016, NDSD-1000 y el presente trabajo. Adaptado de [Hargreaves et al., 2019]. . . . 12
1.9. Nanosatélite desarrollado por CubeSat Team USM [Mateluna Cuadra, 2025] . . . 18
1.10. Satélite de monitoreo NASA Landsat 5 . . . 19
1.11. Satélite de monitoreo Copernicus EU Sentinel-5P . . . 25
1.12. Esquema de separación de columnas atmosféricas en productos TROPOMI. . . . 27
1.13. Diapositiva 4: Dominio de estudio [Petetin et al., 2020]. . . . 28
1.14. Diapositiva 7: Parámetros utilizados para la transformación [Petetin et al., 2020]. . . . 29
1.15. Diapositiva 8: Características recurrentes [Petetin et al., 2020]. . . . 29
1.16. Diapositiva 9: Correlación columna-vs-superficie [Petetin et al., 2020]. . . . 30
1.17. Diapositiva 13: Predicción superficial NO_2: promedio anual [Petetin et al., 2020]. . . . 31
1.18. Diapositiva 14: Predicción superficial NO_2: variación estacional 1 [Petetin et al., 2020]. . . . 31
1.19. Diapositiva 15: Predicción superficial NO_2: variación estacional 2 [Petetin et al., 2020]. . . . 32
1.20. Diapositiva 16: Predicción superficial NO_2: variación estacional 3 [Petetin et al., 2020]. . . . 32
1.21. Diagramas de dispersión de densidad entre las columnas troposféricas de TROPOMI ($TrC - NO_2$) y las concentraciones superficiales de NO_2 al momento del paso del satélite. Adaptado de [Petetin et al., 2022]. 33

1.22. Promedio de NO_2 troposférico detectado por TROPOMI sobre las principales áreas urbanas funcionales de la Península Ibérica. Adaptado de [Petetin et al., 2022]. . . . 34
1.23. Diagrama de dispersión entre el NO_2 troposférico de TROPOMI (Nivel-3) y las observaciones in situ en la Comunidad de Madrid (2022). (a) Datos instantáneos al paso del satélite; (b) Datos promediados en la ventana 12:00-16:00. Adaptado de [Morillas López, 2024]. . . . 35
1.24. - Media móvil de 30 días de la concentración de NO2 observada en superficie (rojo) y por satélite (gris) en Madrid, Barcelona y Valencia, y coeficientes de correlación entre ambas series de datos [Morillas López, 2024]. . . . 36
1.25. Influencia del viento sobre la correspondencia entre los datos de NO2 medido por las estaciones (superficie) y por satélite (columna) [Morillas López, 2024]. . . . 36
1.26. Mapas mensuales de la columna troposférica de NO_2 sobre Madrid (2022), evidenciando la variabilidad estacional y la concentración de la contaminación en el centro urbano durante los meses fríos. Adaptado de [Morillas López, 2024]. . . . 37
1.27. Comparación de concentraciones superficiales anuales inferidas por satélite vs. observaciones in situ. (B) Método estándar asumiendo capa límite uniforme; (C) Nuevo algoritmo desarrollado utilizando la tasa de muestreo de TROPOMI, mostrando una reducción drástica del sesgo (pendiente cercana a 1). Adaptado de [Cooper et al., 2020]. . . . 38
1.28. Comparación de concentraciones medias anuales de NO_2 superficial inferidas por OMI (izquierda) y TROPOMI (derecha) sobre el este de EE. UU. TROPOMI revela estructuras finas y corredores de transporte (puntos A-D) invisibles para sensores de menor resolución. Adaptado de [Cooper et al., 2020]. . . . 39
1.29. Perfiles verticales promedio de NO_2 (negro) y HCHO (rojo) recuperados mediante MAX-DOAS en la estación de Longfengshan. Se observa la acumulación superficial de NO_2 frente a una capa elevada de HCHO. Adaptado de [Liu et al., 2023]. . . . 40
1.30. Variación mensual de las columnas verticales troposféricas (VCD) de NO_2 (a) y HCHO (b). Nótese el ciclo estacional opuesto entre ambos gases, con el NO_2 dominando en meses fríos. Adaptado de [Liu et al., 2023]. . . . 40
1.31. Distribución espacial de la densidad de columna de NO_2 sobre Ucrania. El satélite revela puntos calientes industriales en el este (Donbass) y contaminación urbana en Kiev, supliendo la falta de estaciones terrestres. Adaptado de [Savenets, 2021]. . . . 41
1.32. Comparación de la columna de NO_2 entre enero de 2019 (típico) y enero de 2020 (anómalamente cálido). La meteorología influyó tanto en la demanda de calefacción como en la dispersión. Adaptado de [Savenets, 2021]. . . . 42

2.1. Logo de OpenEO . . . 44
2.2. Logo de Google Earth Engine . . . 44
2.3. Logo de SentinelHub . . . 44
2.4. Diagrama de flujo detallado con lógica de transformación y opciones de altura (H). . . . 45
2.5. Mapa de registros puntuales de concentración de dióxido de nitrógeno en la Región Metropolitana para septiembre de 2019. . . . 50
2.6. Gráfico de barras de medias mensuales del periodo 2018-2024, Región Metropolitana, Parque O'Higgins. 51
2.7. GUI Adicional desarrollada para la descarga . . . 53

2.8. Estaciones seleccionadas: Región de Antofagasta 57
2.9. Estaciones seleccionadas: Región de Valparaíso 57
2.10. Estaciones seleccionadas: Región Metropolitana 58
2.11. Estaciones seleccionadas: Región del Bíobio 58

3.1. Interfaz de usuario configurada para obtener productos desde dos fuentes para el procesamiento de NO_2 troposférico en concentración superficial a partir del uso de BLH obtenida de los datasets de ERA5. . . . 63
3.2. Mapa de concentración troposférica NO_2 generado desde TROPOMI por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. 64
3.3. Histograma de densidad de datos de concentración NO_2 troposférico obtenida desde TROPOMI por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. 64
3.4. Mapa calor de altitud BLH generado desde ERA5 por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. 65
3.5. Histograma de densidad de datos de concentración BLH obtenida desde ERA5 por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana 65
3.6. Mapa de concentración superficial PPB de NO_2 tras procesamiento mediante (1.5) por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. 66
3.7. Histograma de densidad de datos de concentración superficial PPB de NO_2 tras procesamiento mediante (1.5) por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. 66
3.8. Cantidad de píxeles válidos de NO_2 descargados por región y año (2018-2024) mediante TROPOMI. . . 67
3.9. Serie temporal de la mediana de los registros en conjunto al $P90$ dispuesto para Región Metropolitana en el periodo 2018-2024. 69
3.10. Ciclo anual de concentraciones de NO_2 en columna troposférica obtenido desde TROPOMI (Promedio de medianas obtenidas). 70
3.11. Matriz de correlaciones de Pearson por estación ordenada geográficamente de norte a sur. 71
3.12. Matriz de correlaciones promediadas para Chile según las regiones estudiadas (sinca_val $\equiv$ "Valores de SINCA"; tropomi_val $\equiv$ "Valores de TROPOMI". 72
3.13. Serie temporal de contrastes periodo completo, Región Metropolitana, estación Parque O'Higgins 73
3.14. Mapa comparativo de concentración superficial de registros en terreno (SINCA: círculos) y datos satelitales transformados (TROPOMI: mapa de calor). 74
3.15. Diagrama de dispersión de datos correspondiente a la Región Metropolitana para el periodo completo. . . 75
3.16. Boxplot comparativo de estaciones de monitoreo (azul) y registros satelitales (naranjo) en Región Metropolitana durante 2019. 76
3.17. Boxplot comparativo de estaciones de monitoreo (azul) y registros satelitales (naranjo) en Región Metropolitana durante 2023. 77

A.1. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Arica y Parinacota. 91
A.2. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Tarapacá. 92
A.3. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Antofagasta. 92
A.4. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Atacama. 93
A.5. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Coquimbo. 93

A.6. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Valparaíso. 94
A.7. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región Metropolitana. 94
A.8. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de O'Higgins. 95
A.9. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región del Maule. 95
A.10. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región del Biobío. 96
A.11. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de la Araucanía. 96
A.12. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Los Lagos. 97
A.13. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Los Ríos. 97
A.14. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Aysén. 98
A.15. Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Magallanes. 98

B.1. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2018. 99
B.2. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2019. 100
B.3. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2020. 100
B.4. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2021. 101
B.5. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2022. 101
B.6. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2023. 102
B.7. Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2024. 102

C.1. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Super Site, Región de Antofagasta. 103
C.2. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Centro, Región de Antofagasta. 104
C.3. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Puchuncaví, Región de Valparaíso. 104
C.4. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Los Andes, Región de Valparaíso. 105
C.5. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Concón, Región de Valparaíso. 105
C.6. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Las Condes, Región Metropolitana. 106
C.7. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Pudahuel, Región Metropolitana. 106
C.8. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Consultorio San Vicente, Región del Biobío. . 107
C.9. Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Kingston College, Región del Biobío. 107

D.1. Gráfico de dispersión de NO_2 para contraste de fuentes en la Región de Antofagasta. 108
D.2. Gráfico de dispersión de NO_2 para contraste de fuentes en la Región de Valparaíso. 109
D.3. Gráfico de dispersión de NO_2 para contraste de fuentes en la Región del Biobío. 110

E.1. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2018. 111
E.2. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2019. 111
E.3. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2020. 112
E.4. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2021. 112
E.5. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2022. 112
E.6. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2023. 113
E.7. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2024. 113
E.8. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2018. 113
E.9. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2019. 114

E.10. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2020. 114
E.11. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2021. 114
E.12. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2022. 115
E.13. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2023. 115
E.14. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2024. 115
E.15. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2018. . . 116
E.16. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2019. . . 116
E.17. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2020. . . 116
E.18. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2021. . . 117
E.19. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2022. . . 117
E.20. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2023. . . 117
E.21. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2024. . . 118
E.22. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2018. 118
E.23. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2019. 118
E.24. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2020. 119
E.25. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2021. 119
E.26. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2022. 119
E.27. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2023. 120
E.28. Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2024. 120

F.1. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Antofagasta (septiembre 2019). Se contrastan los registros en terreno de SINCA (círculos) con los datos satelitales de TROPOMI (mapa de calor). 121
F.2. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Antofagasta (septiembre 2023). Se observan las diferencias entre estaciones SINCA (círculos) y la estimación satelital TROPOMI (mapa de calor). 122
F.3. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Valparaíso (septiembre 2019). Superposición de datos SINCA (círculos) sobre la trama satelital TROPOMI. 122
F.4. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Valparaíso (septiembre 2023). Visualización de registros puntuales SINCA frente a la distribución espacial de TROPOMI. 123
F.5. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago (septiembre 2019). Contraste entre monitoreo en terreno (círculos SINCA) y teledetección (mapa de calor TROPOMI). 124
F.6. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago (septiembre 2023). Evolución espacial observada mediante datos SINCA y TROPOMI. 125
F.7. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región del Biobío (septiembre 2019). Distribución espacial según TROPOMI (calor) y mediciones locales SINCA (círculos). 126
F.8. Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región del Biobío (septiembre 2023). Comparación visual entre fuentes de datos terrestres y satelitales. 127

Índice de tablas

1.1. Propiedades Físico-Químicas del NO_2 . . . 6
1.2. Reacciones Químicas Clave del NO_2 y sus Efectos . . . 10
1.3. Aporte Anual de NO_X sobre EE. UU. (Adaptada desde [Zhang et al., 2003]) . . . 11
1.4. Resumen de porcentajes de emisiones antopogénicas de NO_2 por sector en 2017 [Huneeus et al., 2022]. . . 12
1.5. Comparación de Tipos de Resolución y Aplicaciones [Asociación Española de Teledetección, 2025] . . . 17
1.6. Niveles de Procesamiento de Datos Satelitales (Adaptado de [Li et al., 2023]) . . . 20
1.7. Especificaciones Técnicas de Landsat 9 . . . 21
1.8. Características de la Misión SWOT . . . 22
1.9. Especificaciones del Instrumento OCI (PACE) . . . 22
1.10. Instrumento VIIRS en Suomi NPP . . . 22
1.11. Especificaciones de ICESat-2 (ATLAS) . . . 23
1.12. Especificaciones del Instrumento TEMPO . . . 23
1.13. Especificaciones Técnicas de Sentinel-1 . . . 24
1.14. Características del Instrumento MSI (Sentinel-2) . . . 25
1.15. Parámetros de Medición de Sentinel-5P (TROPOMI) . . . 25
1.16. Contraste Técnico: Misiones Sentinel (Copernicus) vs. NASA EOS/ESO . . . 26
1.17. Resumen de Correlaciones In-Situ vs. Satélite en Ciudades Españolas (2022) [Morillas López, 2024] . . . 37

2.1. Descripción detallada de todas las funciones del algoritmo de procesamiento satelital. . . . 47
2.2. Muestra de registros con el inicio y fin de la serie: Estación Quillón, Ñuble, 20/12/2014 - 30/09/2017 [Ministerio del Medio Ambiente, 2025]. . . . 48
2.3. Descripción de funciones del script de descarga SINCA. . . . 49
2.4. Paletas de colores de mapas de calor añadidas . . . 54
2.5. Estadísticas de validación de datos por estación [Ministerio del Medio Ambiente, 2025]. . . . 59
2.6. Clasificación operativa de los registros de calidad del aire. . . . 60
2.7. Comparación de convergencia entre Pearson (r) en dos dimensiones ($d = 2$). . . . 61

3.1. Resultados estadísticos de concentración NO_2 troposférico obtenida desde TROPOMI por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. . . . 64
3.2. Resultados estadísticos de concentración altitud de BLH obtenida desde ERA5 por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. . . . 65

3.3. Resultados estadísticos de datos de concentración superficial PPB de NO_2 tras procesamiento mediante (1.5) por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana. 66

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó gracias al financiamiento proporcionado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del proyecto FONDECYT Regular Nº 1241477.

A mi profesor, Mauricio Osses, le extiendo mi más profundo y sincero agradecimiento por haberme brindado la invaluable oportunidad de desarrollar esta investigación de carácter único. Su disposición a acogerme como memorista y su inquebrantable confianza fueron un apoyo esencial, especialmente en las circunstancias que rodearon este inicio. El valor de sus consejos e ideas iniciales permitió que encontrara la dirección para llevar a cabo este proyecto. Es mi mayor deseo que este informe plasme la dedicación y la pasión que puse en cada etapa de la investigación, sirviendo como una modesta demostración del profundo respeto y gratitud que le tengo.

A Marcos, mi jefe, colega, entrenador Pokémon y un amigo sin igual: gracias por una entrega y paciencia envidiables, y por la afinidad y complemento que encontramos al trabajar juntos. Gracias por ser como eres y por estar cuando te necesité.

En memoria de mi Tito, mi Po y mi Lalo. A mi tío futbolero, amoroso, entregado y solemne, el guerrero más fuerte y valiente. A mi abuelo callado, exigente, compañero desde las sombras y el hombre más caballeroso. Y a mi abuelo risueño, asador de primera, constructor de futuros y el mejor forjador de temple y carácter. Sé que me están acompañando en el corazón y agradezco todo lo que me retaron, aconsejaron, quisieron y guiaron. Los quiero, un beso al cielo.

A mi Dacha, mi tata y mi Fedo. Quienes me criaron, me exigieron siempre más y sabían que no daba todo de mí. No hay palabras suficientes para explicar lo mucho que los quiero y los admiro. Sin ustedes, no estaría aquí. Gracias por ser quienes son y por quién me hicieron.

A mis AO, por celebrar mis logros y apoyarme en mis sombras, por molestarme cuando menos tenían que hacerlo y por seguir siendo mi familia tras todos estos años. Son increíbles y atesoro cada momento con ustedes.

A los amigos que gané en la universidad, que han sido muchísimos. Me han acompañado, ayudado, retado y hecho reír en diversas etapas de la carrera. Nombrarlos a todos sería imposible, han sido tan importantes en el proceso que elegir a unos pocos es injusto para el cariño que le guardo a todos ustedes. Agradezco y atesoro cada momento compartido y les deseo éxito en todas sus metas. Un abrazo a todos.

A mi viejo, quien me sigue la corriente en mis locuras, me entiende en mis delirios y más me aconseja. Gracias por las llamadas y las tardes de juego con los niños, por ser mi cable a tierra cuando perdía el rumbo, por ser el filósofo que necesito cuando no soy claro en mis ideas.

Y, finalmente, a mi Nini, mi compañera, mi todo, mi mamá. Quien más creyó en mí, me cuidó y me sacó de lo más profundo para llegar hasta acá. Gracias por tu paciencia, correcciones ortográficas, tardes de música, amor incondicional y compañía. Te mereces todo y más.

Resumen

Esta investigación se centró en el análisis y validación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO2) superficial en Chile para el periodo 2018-2024, con el fin de establecer la teledetección como un complemento eficaz a la limitada cobertura de la red nacional de monitoreo terrestre (SINCA).

El objetivo principal fue cuantificar la variación espacio-temporal de las concentraciones de NO2 superficial integrando datos satelitales troposféricos con mediciones en terreno. Para ello, se desarrolló un ecosistema de software con una interfaz gráfica de usuario (GUI) y un algoritmo de descarga automatizada basado en Sentinel Hub (para datos TROPOMI Nivel 2).

La metodología de transformación cumplió el objetivo de elaborar un proceso de conversión robusto. Se implementó una fórmula de conversión columna-superficie (basada en el planteamiento de Savenets (1.5)), utilizando la Altura de la Capa Límite Planetaria (por sus siglas en inglés BLH) del reanálisis ERA5 como factor dinámico para ajustar la dispersión atmosférica del contaminante.

Resultados y Cumplimiento de Objetivos:

1. Transformación Validada: La metodología de conversión demostró ser altamente eficaz. El contraste estadístico con las mediciones de superficie (SINCA) mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r) arrojó un valor promedio general de 0,81, superando el umbral de aceptación del 0,75 establecido en la metodología.

2. Correlación Óptima: En las estaciones con un alto porcentaje de datos validados, como en la Región Metropolitana (e.g., Pudahuel 2023 con $r \approx 0,97$ y Las Condes 2022 con $r \approx 0,96$), el satélite TROPOMI logró capturar la misma tendencia y comportamiento de las concentraciones que la red de monitoreo.

3. Variabilidad Estacional: Se confirmó un marcado ciclo anual con concentraciones máximas en otoño e invierno (abril y mayo), lo cual es consistente con la estabilidad atmosférica y la menor tasa de fotólisis en estos periodos.

4. Limitaciones: Se identificó una limitación crítica: la eficacia del modelo está fuertemente condicionada por la calidad de los datos terrestres. Regiones con gran densidad de registros no validados o preliminares (como Antofagasta y Valparaíso) mostraron una correlación significativamente baja o divergente.

Conclusión: La metodología de descarga y transformación de datos satelitales se establece como un complemento eficaz a los registros de SINCA. Se recomienda que el uso de este modelo se centre en áreas geográficas, como la Región Metropolitana, que poseen el mayor porcentaje de estaciones con validación oficial, manteniendo un criterio de correlación cruzada superior a 0,80 para asegurar su fiabilidad. La herramienta desarrollada (GUI) también cumplió el objetivo de mejorar la accesibilidad a estos productos geofísicos para futuros estudios de impacto en salud.

Abstract

This research focused on the analysis and validation of surface nitrogen dioxide (NO2) concentration in Chile for the 2018-2024 period, aiming to establish remote sensing as an effective complement to the limited coverage of the ground monitoring network (SINCA).

The main objective was to quantify the spatiotemporal variation of surface NO2 concentrations by integrating tropospheric satellite data with ground-based measurements. To this end, a software ecosystem was developed featuring a graphical user interface (GUI) and an automated download algorithm based on Sentinel Hub (for TROPOMI Level 2 data).

The transformation methodology met the objective of developing a robust conversion process. A column-to-surface conversion formula was implemented (based on Savenets' approach (1.5)), utilizing the Planetary Boundary Layer Height (BLH) from the ERA5 reanalysis as a dynamic factor to adjust for the atmospheric dispersion of the pollutant.

Results and Achievement of Objectives:

1. Validated Transformation: The conversion methodology proved to be highly effective. The statistical comparison with surface measurements (SINCA) using the Pearson correlation coefficient (r) yielded an overall average value close to 0,81, exceeding the acceptance threshold of 0,75 established in the methodology.

2. Optimal Correlation: In stations with a high percentage of validated data, such as in the Metropolitan Region (e.g., Pudahuel 2023 with $r \approx 0,97$ and Las Condes 2022 with $r \approx 0,96$), the TROPOMI satellite successfully captured the same trend and behavior of concentrations as the monitoring network.

3. Seasonal Variability: A marked annual cycle was confirmed, with maximum concentrations in autumn and winter (April and May), which is consistent with atmospheric stability and lower photolysis rates during these periods.

4. Limitations: A critical limitation was identified: the model's efficacy is strongly conditioned by the quality of ground data. Regions with a high density of non-validated or preliminary records (such as Antofagasta and Valparaíso) showed significantly low or divergent correlations.

Conclusion: The satellite data download and transformation methodology is established as an effective complement to SINCA records. It is recommended that the use of this model focus on geographic areas, such as the Metropolitan Region, which possess the highest correlation of officially validated stations, maintaining a cross-correlation criterion above 0,80 to ensure its reliability. The developed tool (GUI) also met the objective of improving accessibility to these geophysical products for future health impact studies.

Introducción

A lo largo del tiempo, el desarrollo de nuevas herramientas ha permitido a la humanidad avanzar en la comprensión y gestión de la información proveniente del entorno. No obstante, dichos avances también han revelado diversos desafíos asociados a su implementación. Un caso representativo es el de la teledetección, tecnología que posibilita la adquisición remota de datos mediante sensores instalados en plataformas satelitales, aéreas o terrestres. Esta técnica permite la recolección de información que, tras su procesamiento y análisis, contribuye significativamente al estudio de fenómenos ambientales de gran relevancia, como la contaminación del aire.

En este contexto, el dióxido de nitrógeno (NO_2) se ha identificado como uno de los principales contaminantes atmosféricos, debido a su alta toxicidad y a sus múltiples impactos negativos sobre la salud humana y los ecosistemas. Su presencia se vincula con el desarrollo de enfermedades respiratorias, la alteración de procesos fisiológicos en las plantas —como la fotosíntesis—, y la formación de ozono troposférico, un contaminante secundario que deteriora aún más la calidad del aire. Las emisiones de NO_2 pueden tener origen tanto natural como antropogénico, siendo estas últimas, especialmente las derivadas del transporte y la actividad industrial, las que predominan en entornos urbanos.

Desde el reconocimiento de los efectos perjudiciales asociados a la acumulación de este gas, se han promovido diversas estrategias para su control, incluyendo reformas legislativas, dispositivos de mitigación y políticas públicas. Sin embargo, además de establecer mecanismos de regulación, resulta crucial identificar con precisión las zonas geográficas donde las concentraciones de NO_2 alcanzan niveles críticos. En este sentido, la observación satelital se ha consolidado como una herramienta complementaria a los métodos de monitoreo in situ, permitiendo una cobertura espacial más amplia y continua.

La poca presencia de estaciones de seguimiento terrestre en el país impide realizar una labor continua e infalible, pues, en casos de falla de equipos, cortes de suministro eléctrico o modificaciones en el personal operativo alteran el funcionamiento de estas, sin olvidar la falta de un número representativo de estas en varias regiones.

El presente informe tiene por objetivo analizar la concentración de NO_2 en distintas áreas urbanas del territorio nacional, utilizando datos satelitales proporcionados por la misión Sentinel-5 Precursor, parte del programa europeo Copernicus. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo de descarga automatizada y posterior análisis estadístico de los datos, con el fin de evaluar la aplicabilidad de esta tecnología en la vigilancia ambiental. Este enfoque busca demostrar el potencial de la teledetección como una alternativa efectiva para el monitoreo atmosférico, aportando evidencia científica que pueda sustentar decisiones orientadas a la protección del medio ambiente y la salud pública, aportando, a su vez, una alternativa de obtención de registros de calidad del aire en el país a la ya existente.

Objetivos

Principal

Cuantificar la variación espacio-temporal de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) superficial en Chile entre 2018 y 2024, integrando datos satelitales troposféricos con mediciones en terreno.

Específicos

1. Analizar las concentraciones de NO_2 en todas las regiones de Chile durante el período 2018-2024, a partir de datos obtenidos por sensores satelitales.
2. Elaborar un proceso de transformación de datos troposféricos a concentraciones superficiales, mediante un enfoque de conversión columna-superficie.
3. Contrastar los resultados satelitales con mediciones superficiales de la red de monitoreo SINCA para cuatro ciudades de relevancia nacional.
4. Generar una base de datos de concentraciones de NO_2, para las regiones Metropolitana de Santiago y de Valparaíso, orientadas a estudios de impacto en la salud de la población.

Capítulo 1

Estado del arte

1.1. Conceptos clave

1.1.1. El Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

Descripción general

Su estudio es fundamental debido al rol de este en la química atmosférica. No solo es perjudicial por sí mismo, sino que también da origen a contaminantes secundarios, como el ozono troposférico (O_3) y las partículas finas en suspensión ($PM_{2.5}$), los cuales contribuyen a la formación de smog y lluvia ácida. Además, actúa como una especie de intermediario, facilitando las reacciones químicas que agravan la contaminación inicial. Controlar sus emisiones ayuda a mejorar diversos aspectos de la calidad del aire al mismo tiempo, convirtiéndolo en un foco principal de las políticas ambientales.

Características Químicas Fundamentales

Fórmula Química y Estructura Molecular El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un compuesto formado por un átomo de nitrógeno y dos de oxígeno. Su molécula posee una estructura angular y presenta propiedades paramagnéticas, es decir, responde a campos magnéticos debido a la presencia de electrones no apareados [PubChem, 2005]. Esta característica es esencial para su identificación mediante técnicas espectroscópicas avanzadas, como la resonancia paramagnética electrónica. Dichos electrones generan señales específicas que permiten reconocer con precisión al NO_2 en métodos de análisis y monitoreo ambiental.

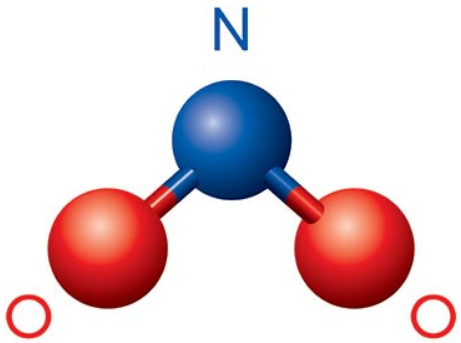


Figura 1.1: Estructura química del NO_2

Estado de Oxidación En el NO_2, el nitrógeno exhibe estado de oxidación +4. Este elemento presenta amplia gama de estados de oxidación (-3 a +5), observándose estados positivos al unirse a elementos más electronegativos como el oxígeno.

Algunos ejemplos de esto serían:

Compound, structure	Oxidation state
Nitrate, NO_3^-	+5
Nitrogen dioxide, NO_2	+4
Nitrite, NO_2^-	+3
Nitric oxide, NO	+2
Nitroxyl, HNO	+1
Nitrogen, N_2	0
Hydroxylamine, NH_2OH	-1
Ammonia, NH_3	-3

Figura 1.2: Productos del nitrógeno con su respectivo estado de oxidación [Bellavia et al., 2015].

El estado de oxidación se define formalmente como la carga que poseería un átomo si todos sus enlaces se consideraran bajo una aproximación iónica. Este concepto es de naturaleza cuantitativa y opera mediante valores enteros, lo cual propone una idealización de la realidad física del átomo.

Esta aproximación asume una transferencia electrónica completa, un criterio que resulta problemático en enlaces entre átomos del mismo elemento (enlaces homonucleares), como es el caso del enlace triple ($N \equiv N$) en el óxido nitroso (N_2O). En estos escenarios, aplicar la aproximación iónica estricta generaría valores extremos e irreales, por lo que se requiere asignar los electrones de manera equitativa entre los átomos idénticos [Karen, 2015].

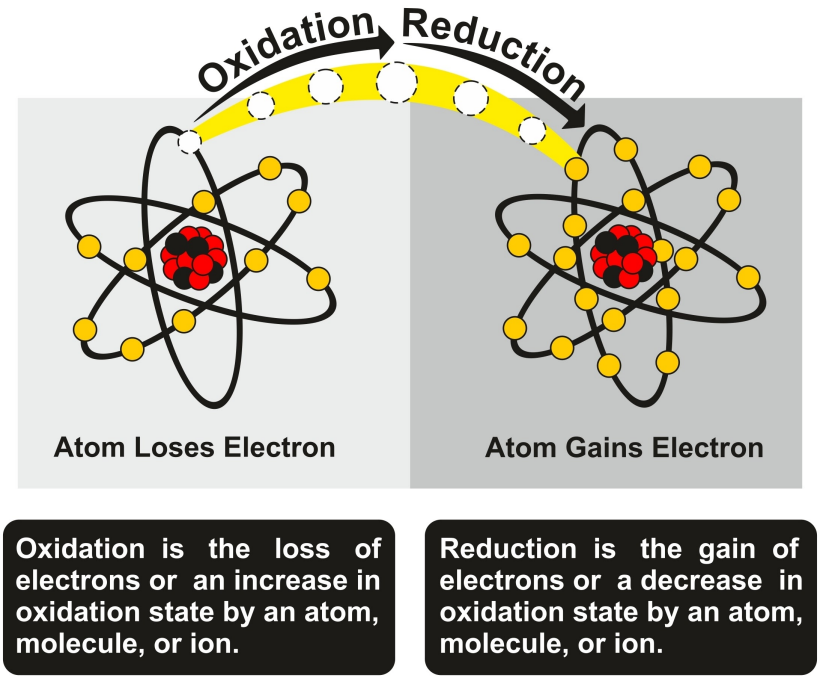


Figura 1.3: Diagrama infográfico del Proceso de Oxidación y Reducción [udaix, 2017].

Sin embargo, la importancia del estado de oxidación radica en su capacidad para $\mathrm{transformar\ una\ realidad\ compleja}$ $(\mathrm{la\ distribución\ continua\ de\ densidad\ electrónica})$ $\mathrm{en\ un\ valor\ entero\ manejable}$. Esta simplificación es crucial porque:

- Permite sistematizar y predecir el comportamiento reactivo de los elementos.
- Facilita el seguimiento de la transferencia de electrones en reacciones de óxido-reducción (redox).
- Provee un lenguaje común para la nomenclatura inorgánica y la clasificación de compuestos, permitiendo distinguir entre diferentes especies químicas de un mismo elemento basándose en su entorno electrónico, a pesar de las idealizaciones necesarias para su cálculo.

Propiedades Físicas A 25[°C] y 1[atm], el $\mathrm{NO_2}$ se presenta como gas pardo-rojizo de olor sofocante. Sus puntos de fusión y ebullición son -11[°C] y 21[°C] respectivamente. Es soluble en agua $\sim 77\,\%$ a $1[\mathrm{bar}]$ [Tan and Piri, 2013], tóxico, y se clasifica como oxidante altamente reactivo y corrosivo.

Vida Media Atmosférica La vida media atmosférica del $\mathrm{NO_2}$ oscila entre horas y días, dependiendo de condiciones atmosféricas como radiación solar y presencia de reactivos. Fei Liu describió cómo calcular la duración de vida (τ) del $\mathrm{NO_2}$ a partir de la relación entre la distancia de e-pliegue (x_0) y la velocidad media del viento (w), determinada mediante la siguiente relación:

$$\tau = \frac{x_0}{w} \tag{1.1}$$

Para derivar este parámetro x_0 en entornos con múltiples fuentes, se utiliza un modelo de ajuste que emplea el patrón de $\mathrm{NO_2}$ bajo condiciones de calma ($C(x)$) como representación de las emisiones, comparándolo con las condiciones de viento mediante la siguiente convolución descrita ($N(x)$):

$$N(x) = a \times [e \otimes C](x) + b \tag{1.2}$$

donde $e(x)$ es la función de decaimiento exponencial, y a y b son parámetros de escala y desplazamiento respectivamente.

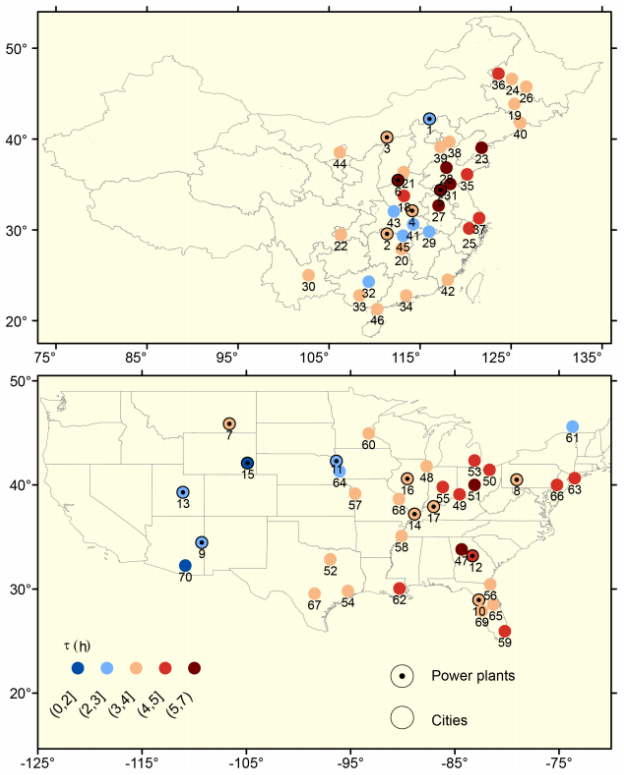


Figura 1.4: Vidas medias de NO_X ajustadas para las fuentes de emisión estudiadas en China y EE. UU. Los colores indican la duración de la vida útil en horas. Según este estudio, los valores típicos para la temporada de ozono (mayo-septiembre) son de $3,8 \pm 1,0$ horas, con un rango observado de 1,8 a 7,5 horas [Liu et al., 2016].

Resumiendo las propiedades antes mencionadas, se tiene:

Cuadro 1.1: Propiedades Físico-Químicas del NO_2

Propiedad	**Característica**	**Referencia**
Fórmula Química	NO_2	[PubChem, 2005]
Estado de Oxidación (N)	+4	[Bellavia et al., 2015]
Estado Físico (25°C, 1 atm)	Gas	[PubChem, 2005]
Color	Pardo-rojizo	[PubChem, 2005]
Olor	Sofocante	[PubChem, 2005]
Solubilidad en Agua	Soluble	[Tan and Piri, 2013]
Efectos dañinos en salud	Oxidante, reactivo, toxicidad aguda y corrosivo	[PubChem, 2005]
Vida Media Atmosférica	Horas a días	[Liu et al., 2016]

Relación con Óxido Nítrico (NO) y NO_X

Definición y Composición de NO_X El término NO_X engloba gases reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones, refiriéndose principalmente a la combinación de óxido nítrico (NO, incoloro) y dióxido de nitrógeno (NO_2, pardo-rojizo).

Interconversión Fotoquímica En la atmósfera, el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nítrico (NO) se transforman rápidamente entre sí a través de reacciones que ocurren con la luz solar:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \tag{1.3}$$

$$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O \tag{1.4}$$

donde $h\nu$ representa un fotón de luz. Estas reacciones mantienen un equilibrio foto-químico durante las horas de radiación solar, lo que demuestra que el NO_2 no solo se emite como contaminante primario, sino que también participa en un ciclo dinámico de transformación química en la atmósfera. Este proceso se denomina $\mathrm{fotólisis}$ y consiste en la ruptura de enlaces moleculares inducida por la absorción de luz, en la que el fotón aporta la energía suficiente para disociar al NO_2 en NO y oxígeno atómico. Esta reacción es fundamental para la formación de ozono troposférico y regula la distribución de especies reactivas durante el día [Seo et al., 2024].

Indicador de Emisiones Antropogénicas Los NO_X son indicadores cruciales de emisiones antropogénicas, principalmente de combustión de combustibles fósiles en vehículos (especialmente diésel), centrales eléctricas e industrias. Un cambio relevante es que motores diésel modernos emiten NO_2 directamente como emisor primario, reduciendo la "titulación"de ozono por NO y potencialmente incrementando concentraciones de O_3. Este fenómeno ilustra cómo mejoras tecnológicas pueden alterar balances fotoquímicos atmosféricos inesperadamente.

Formación de Ozono Troposférico

Dinámica Diaria de Concentraciones Las concentraciones de NO y NO_2 varían a lo largo del día. Durante las horas de sol, la radiación promueve la fotólisis del NO_2 (Ecuación 1.4), mientras que el NO tiende a reaccionar con ozono (Ecuación 1.3). Al llegar la tarde y desaparecer la luz solar, el proceso de fotólisis se detiene, lo que provoca un aumento en la concentración de NO_2. Al mismo tiempo, en zonas urbanas con emisiones altas de NO, el ozono disminuye debido a su continua reacción con este gas.

Mecanismo de Fotólisis La formación de ozono troposférico inicia con la fotólisis del NO_2 bajo radiación UV-A (295-430 nm):

$$NO_2 + h\nu\,(\lambda < 424\ \mathrm{nm}) \rightarrow NO + O(^3P)$$

generando oxígeno atómico altamente reactivo.

Formación de Ozono El oxígeno atómico [$O(^3P)$] se combina rápidamente con oxígeno molecular (O_2) en presencia de una tercera molécula (M) que absorbe el exceso de energía:

$$O(^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

Consumo de Ozono por NO (Titulación) El óxido nítrico consume ozono mediante una reacción rápida:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

Este proceso es fundamental para comprender la dinámica de los contaminantes atmosféricos, particularmente en entornos urbanos. Según un estudio realizado por René Parra (2017), esta reacción de titulación explica por qué, en ausencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) suficientes, el O_3 se combina con el NO para regenerar NO_2 y O_2, actuando efectivamente como un sumidero de ozono.

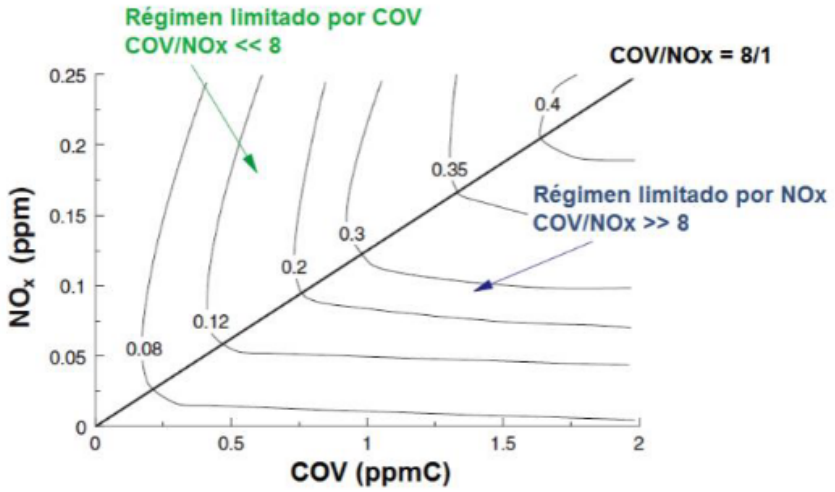


Figura 1.5: Isopletas de concentraciones de O_3 en función de NO_X y COV, mostrando los regímenes limitados por cada precursor [Parra, 2017].

Este fenómeno se hace evidente al observar el "Efecto Fin de Semana", donde la reducción de las emisiones de precursores como el NO_X (debido a la disminución del tráfico vehicular los fines de semana) resulta paradójicamente en concentraciones de O_3 iguales o superiores a las de los días laborables. Esto ocurre porque, al haber menos NO disponible para reaccionar con el ozono (reacción 3), se reduce la destrucción de este contaminante secundario en la superficie, permitiendo su acumulación a pesar de las menores emisiones globales.

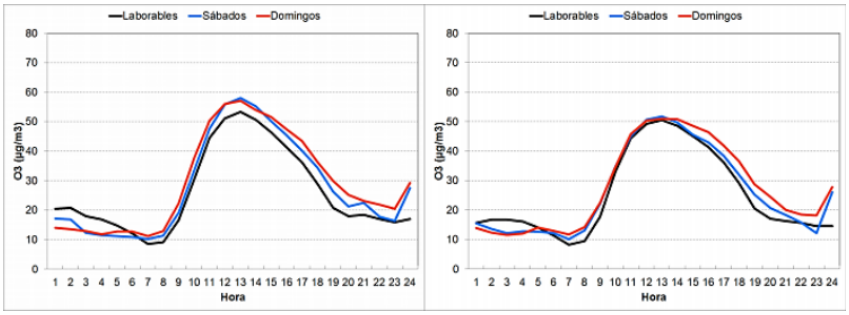


Figura 1.6: Perfiles promedio diarios de O_3 en Cuenca (2013-2015). Se observa cómo las concentraciones en fines de semana (líneas de color) superan o igualan a las de días laborables (línea negra) durante las horas de mayor insolación [Parra, 2017].

Rol de COVs y Radicales Peroxi Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) alteran el ciclo fotoestacionario al generar radicales peroxi (RO_2, HO_2) que oxidan el NO a NO_2 sin consumir ozono:

$$RO_2 + NO \rightarrow NO_2 + RO^{\bullet}$$
$$HO_2 + NO \rightarrow NO_2 + OH^{\bullet}$$

Esta vía alternativa rompe el equilibrio y permite la acumulación neta de ozono troposférico.

Regímenes Fotoquímicos La relación no lineal entre ozono y precursores (NO_X y COVs) define dos regímenes de control:

- Régimen limitado por NO_X: En ambientes rurales o de fondo, la formación de O_3 depende de la disponibilidad de NO_2. Reducir NO_X disminuye el ozono.

- Régimen limitado por COVs: En centros urbanos saturados de NO_X, reducir el NO_X puede incrementar paradójicamente el ozono (al reducir el efecto de titulación). Aquí la estrategia efectiva es controlar los COVs.

Formación de Material Particulado Fino ($PM_{2.5}$)

Comportamiento como Precursor El NO_2 actúa como precursor crucial en la formación de especies secundarias atmosféricas. Se convierte en principal causante de lluvia ácida al reaccionar con agua formando ácido nítrico (HNO_3), además de participar en la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico.

Durante el día, el NO_2 reacciona con el radical hidroxilo (OH):

$$NO_2 + OH^{\bullet} \rightarrow HNO_3$$

El HNO_3 gaseoso es un precursor clave de partículas secundarias y componente fundamental de la deposición ácida.



Figura 1.7: Impacto visual de la deposición ácida en estructuras urbanas. Fuente: Adaptado de [Diario Digital Colombiano, 2015].

Formación de Nitrato de Amonio El ácido nítrico reacciona con amoníaco atmosférico (procedente de agricultura o vehículos):

$$\mathrm{HNO_3} + \mathrm{NH_3} \leftrightarrow \mathrm{NH_4NO_3}\,(\text{partícula secundaria})$$

El nitrato de amonio ($\mathrm{HN_4NO_3}$) es un componente significativo del $\mathrm{PM_{2.5}}$, siendo altamente soluble e higroscópico.

Crecimiento de Aerosoles El nitrato de amonio contribuye al crecimiento de aerosoles inorgánicos secundarios. Las partículas nucleadas ($<0.1\mu$m) actúan como superficies de condensación, facilitando el crecimiento hacia el rango de acumulación, proceso fundamental en la formación de smog invernal y la reducción de visibilidad [Pathak et al., 2009].

Influencia de Condiciones Ambientales La formación de $\mathrm{HN_4NO_3}$ es termodinámicamente favorable en condiciones $\mathrm{frías\ y\ húmedas}$. A altas temperaturas, el equilibrio se desplaza hacia los gases (disociación), lo que explica por qué los episodios críticos de $\mathrm{PM_{2.5}}$ por nitratos suelen ocurrir en invierno [Dall'Osto et al., 2009].

Formación de PANs Los peroxiacilnitratos (PANs) se forman mediante la reacción de $\mathrm{NO_2}$ con radicales derivados de COVs. Actúan como reservorios"de $\mathrm{NO_X}$, transportando contaminantes a largas distancias antes de descomponerse por calor, liberando precursores de ozono en zonas remotas [Wang et al., 2023].

En resumen:

Cuadro 1.2: Reacciones Químicas Clave del $\mathrm{NO_2}$ y sus Efectos

Reacción Simplificada	**Descripción del Proceso**	**Efecto Ambiental / Impacto**
$\mathrm{NO_2} + h\nu \rightarrow \mathrm{NO} + \mathrm{O}$	Fotólisis (luz UV)	Inicia la producción de "smog"fotoquímico.
$\mathrm{O} + \mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{O_3}$	Combinación con oxígeno	**Generación de Ozono Troposférico** (contaminante criterio).
$\mathrm{NO} + \mathrm{O_3} \rightarrow \mathrm{NO_2} + \mathrm{O_2}$	Titulación (consumo)	Reduce temporalmente el ozono en zonas de alto tráfico.
$\mathrm{RO_2} + \mathrm{NO} \rightarrow \mathrm{NO_2} + \mathrm{RO}$	Reciclaje de $\mathrm{NO_X}$ por COVs	Acumulación neta de ozono (evita su consumo).
$\mathrm{NO_2} + \mathrm{OH} \rightarrow \mathrm{HNO_3}$	Oxidación diurna	Formación de lluvia ácida y eliminación de $\mathrm{NO_X}$ del aire.
$\mathrm{HNO_3} + \mathrm{HN_3} \leftrightarrow \mathrm{HN_4NO_3}$	Neutralización	**Formación de $\mathrm{PM_{2.5}}$** secundario y reducción de visibilidad.
$\mathrm{NO_2} + \mathrm{COVs} \rightarrow \mathrm{PANs}$	Formación de reservorios	Transporte de contaminación a zonas rurales/lejanas; irritación ocular.

Sumideros Atmosféricos

Fuentes de Dióxido de Nitrógeno Las emisiones de óxidos de nitrógeno ($\mathrm{NO_X}$) provienen en su gran mayoría de fuente antropogénicas.

El estudio publicado por Zhang en 2003 evaluó la influencia de las emisiones de este contaminante sobre los Estados Unidos, diferenciando entre fuentes antropogénicas (combustibles fósiles, quema de biomasa) y naturales (emisiones del suelo, rayos) [Zhang et al., 2003].

En términos de emisiones de masa total anual sobre EE.UU., las fuentes antropogénicas son abismalmente superiores a sus contrapartes de origen natural.

Cuadro 1.3: Aporte Anual de NO_X sobre EE. UU. (Adaptada desde [Zhang et al., 2003])

Fuente	Tipo de Aporte	Aporte Anual (Tg N año^{-1})
Combustibles Fósiles (Antropogénico)	Superficie	7,3
Emisiones del Suelo (Natural)	Superficie	0,5
Rayos (Natural)	Troposfera Libre	0,4
Quema de Biomasa (Antropogénico)	Superficie	0,3

- Las emisiones por combustibles fósiles representan la mayor fuente, con 7,3 $\mathrm{Tg\ N\ año^{-1}}$.
- Los rayos representan solo aproximadamente el $5\,\%$ de la emisión total anual, con $0{,}4\ \mathrm{Tg\ N\ año^{-1}}$. Sin embargo, este porcentaje asciende a $\approx 14\,\%$ del total en julio.

A su vez, es posible identificar la influencia de la altitud de la emisión en las concentraciones de NO_X y O_3, esto se evidencia en los siguientes valores:

- $\mathrm{Troposfera\ Inferior}\ (0-5\ \mathrm{km})$: La producción de NO_X y O_3 está dominada por las $\mathrm{emisiones\ de\ superficie}$ (antropogénicas), donde la vida útil de NO_X es de solo unas pocas horas.
- $\mathrm{Troposfera\ Media\ y\ Superior}\ (5-15\ \mathrm{km})$: Los $\mathrm{rayos\ en\ verano}$ son la fuente dominante. El NO_X se deposita directamente en la troposfera libre (ej., un rayo común de nube a tierra [CG] se extiende hasta $8\ \mathrm{km}$). En esta región, la vida útil de NO_X es mucho mayor (hasta unos pocos días).
  - En $\mathrm{julio\ y\ agosto}$, el NO_X de rayos y el de superficie contribuyen casi por igual al presupuesto total de NO_X en la troposfera.
  - En la troposfera superior, el impacto del rayo en el presupuesto de NO_X alcanza el $90\,\%$ en julio y agosto.
  - La influencia de los rayos en el O_3 de la troposfera superior alcanza el $\approx 30\,\%$ o más en el rango de $4\ \mathrm{km}$ a $12\ \mathrm{km}$.

La importancia del rayo radica en su capacidad para transportar NO_X y, por ende, promover la producción de O_3 a escala regional y global.

A nivel local y especialmente en zonas urbanas, el papel de las actividades humanas es aún más notorio: el transporte puede generar más del $75\,\%$ del NO_2 en ciudades [European Environment Agency (EEA), 2023, Commission for Environmental Cooperation (CEC), sf], y en 2020 representó el $38\,\%$ del total de emisiones en la Unión Europea [Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE), 2022].

En el ámbito nacional, un estudio publicado por Nicolás Huneeus en 2022 analiza y expone el primer inventario de alta resolución ($1\ \mathrm{km}\times 1\ \mathrm{km}$) de emisiones antropogénicas en Chile, denominado INEMA. El documento pone un énfasis crítico en los óxidos de nitrógeno (NO_X), categoría que incluye al dióxido de nitrógeno (NO_2), revelando que el sector transporte es el emisor predominante, responsable de 92 kilotoneladas anuales, lo que representa cerca de la mitad del total nacional ($213[\mathrm{kt\ a^{-1}}]$). Esta concentración de NO_X prevalece en la zona central debido a la alta densidad urbana y flujo vehicular. Además, el estudio evidencia que la suma de los sectores energía e industria aporta una cantidad equivalente al transporte, subrayando que, a diferencia del material particulado (dominado por leña residencial), la mitigación del NO_2 exige estrategias focalizadas en fuentes móviles y procesos industriales [Huneeus et al., 2022].

Cuadro 1.4: Resumen de porcentajes de emisiones antopogénicas de NO_2 por sector en 2017 [Huneeus et al., 2022].

Fuente Específica o Contexto	**Masa total aportada [kt a^{-1}]**	**Porcentaje de Contribución**
Producción energética	51,8[kt a^{-1}]	24,32 %
Funcionamiento y operación industrial	37,8[kt a^{-1}]	17,75 %
Extracción minera	3,9[kt a^{-1}]	1,83 %
Actividad residenciales	27,4[kt a^{-1}]	12,86 %
Medios de transporte	92,0[kt a^{-1}]	43,19 %
Total	212,9[kt a^{-1}]	100,00 %

Espectro Característico

Espectro UV-Visible Presenta fuerte absorción entre 320–400[nm] (peak $\approx$ 340 [nm]), utilizada en sensores remotos como el Espectroscopio de Absorción Óptica Diferencial (DOAS) e instrumentos satelitales (TROPOMI, OMI). La intensidad y forma de las bandas son sensibles a la temperatura y presión.

Espectro IR (Vibracional) El dióxido de nitrógeno presenta bandas características de absorción en el infrarrojo, correspondientes a sus modos vibracionales fundamentales. Según las actualizaciones recientes de la base de datos HITEMP, los centros de banda precisos son [Hargreaves et al., 2019]:

- ν_1 (estiramiento simétrico): $\approx$ 1319.7 [cm^{-1}]
- ν_2 (flexión): $\approx$ 749.6 [cm^{-1}]
- ν_3 (estiramiento asimétrico): $\approx$ 1616.8 [cm^{-1}]

Estas firmas espectrales son utilizadas en espectroscopía láser de alta resolución (como TILDAS o CRDS) para la cuantificación precisa del gas.

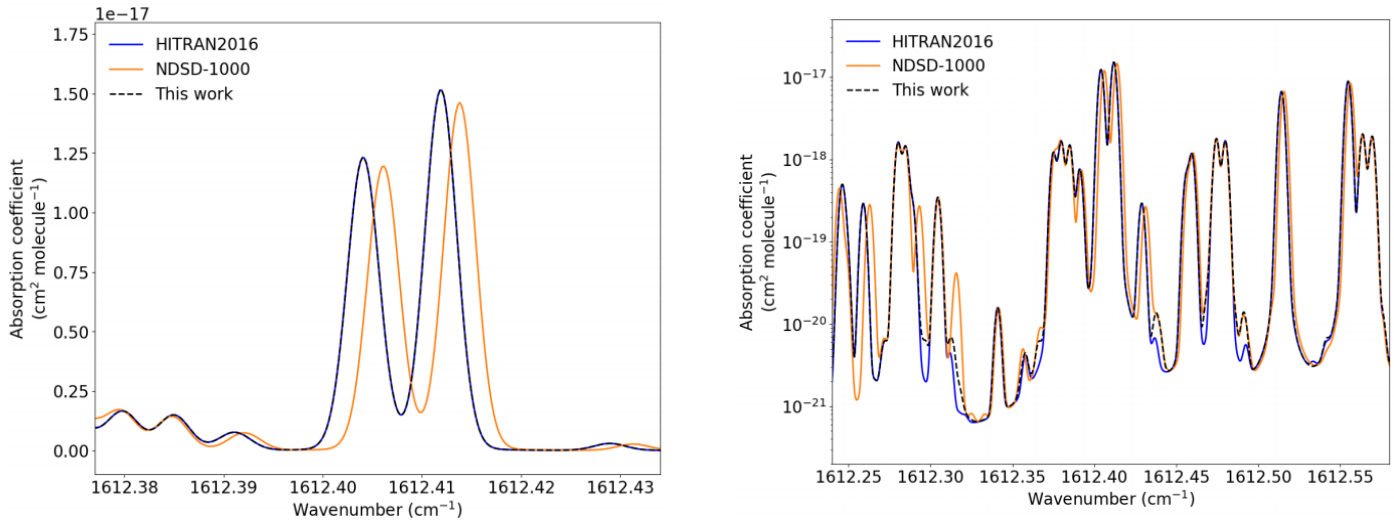


Figura 1.8: Secciones eficaces de absorción del NO_2 en la región de la banda ν_3. Comparación entre HITRAN2016, NDSD-1000 y el presente trabajo. Adaptado de [Hargreaves et al., 2019].

La figura expuesta en el documento de Robert J. Hargreaves sobre la precisión espectral en la región de la banda ν_3 (cercana a 1612.4 cm^{-1}). Históricamente, las bases de datos orientadas a altas temperaturas, como NDSD-1000 (línea naranja), presentaban inconsistencias en las intensidades y un desplazamiento en el número de onda respecto al estándar atmosférico HITRAN2016 (línea azul).

Como se observa en el gráfico, la actualización presentada en este trabajo (línea negra) corrige los errores de posición e intensidad que tenían las bases de datos anteriores (NDSD-1000). Esto es fundamental para misiones satelitales actuales como el Sentinel-5P (TROPOMI): estos instrumentos dependen de referencias espectrales precisas para calcular la cantidad de NO_2 en la atmósfera. Si se utilizaran los parámetros antiguos y desplazados, el satélite interpretaría erróneamente la luz recibida, entregando mapas de contaminación con valores falsos o imprecisos. La coincidencia lograda aquí con el estándar HITRAN2016 asegura que los modelos físicos utilizados para procesar las imágenes satelitales sean confiables tanto para concentraciones altas como bajas.

1.1.2. Definición y Conceptos Fundamentales de Teledetección

Descripción y orígenes históricos

Naturaleza y Alcance La teledetección, también conocida como percepción remota, constituye la ciencia y tecnología que permite obtener información sobre objetos, áreas o fenómenos sin contacto físico directo [NASA Applied Sciences, 2023]. Esta disciplina abarca técnicas que van desde la fotografía aérea tradicional hasta complejos sistemas satelitales operados desde el espacio, recolectando datos mediante instrumentos montados en plataformas terrestres, aeronaves o satélites orbitales. Su naturaleza no invasiva facilita el estudio de vastas extensiones geográficas y el acceso a zonas remotas o peligrosas, proporcionando un monitoreo continuo a escala global [iSE-Academy, 2025]. Esta capacidad ofrece una perspectiva macroscópica que las mediciones in-situ no pueden igualar en términos de cobertura espacial o resolución temporal, complementando y escalando significativamente las capacidades de observación científica [Asociación Española de Teledetección, 2025].

Desarrollo Histórico: De la Fotografía Aérea al Espacio Los inicios de la teledetección se remontan a la era de los globos aerostáticos y la fotografía del siglo XIX, con la primera observación aérea documentada hacia 1794 [European Space Agency, 2025b]. La disciplina maduró significativamente con los conflictos bélicos del siglo XX: durante la Primera Guerra Mundial, aviones de reconocimiento equipados con cámaras convencionales monitorearon movimientos de tropas, mientras que la Segunda Guerra Mundial perfeccionó estas técnicas mediante el uso de película infrarroja para distinguir la vegetación real de los camuflajes militares [Chuvieco, 2010]. Hacia la década de 1960, el uso de películas sensibles a distintas longitudes de onda permitió cartografiar tipos específicos de vegetación y suelos, evidenciando una evolución tecnológica impulsada inicialmente por necesidades militares que sentaron las bases para posteriores aplicaciones civiles y ambientales [European Space Agency, 2025b].

Durante la carrera espacial desarrollada en la segunda mitad del siglo XX, se produjo un salto cualitativo al trascender la atmósfera terrestre. La competencia tecnológica aceleró el desarrollo de sensores capaces de operar en el vacío y transmitir datos electrónicamente, eliminando la necesidad de recuperar rollos de película físicos. Las misiones tripuladas, como las de los programas Gemini y Apollo, no solo capturaron imágenes icónicas de la Tierra, sino que demostraron la viabilidad técnica de la observación orbital sistemática, impulsando la transición de la fotografía analógica a los sensores digitales multiespectrales [Chuvieco, 2010].

Hitos Tecnológicos y Consolidación Satelital La teledetección moderna se consolidó formalmente con el lanzamiento del Sputnik (1957) y la posterior puesta en órbita de satélites de observación dedicados, marcando el inicio de la era de la monitorización global:

- TIROS-1 (1960): Primer satélite meteorológico exitoso, el cual proporcionó las primeras imágenes televisadas de formaciones nubosas, revolucionando la predicción del tiempo y la comprensión de la dinámica atmosférica [NASA Applied Sciences, 2023].

- LANDSAT-1 (1972): Originalmente llamado ERTS-1, fue el primer satélite diseñado específicamente para el monitoreo de recursos terrestres. Equipado con el escáner multiespectral (MSS), generó datos pioneros en matrices corológicas digitales, estandarizando el uso de múltiples bandas espectrales para el análisis de la superficie terrestre.

Esta transición a plataformas satelitales permitió evolucionar de una cobertura local esporádica a una observación global consistente y repetitiva. El establecimiento de estos sistemas creó archivos de datos históricos esenciales que hoy permiten analizar tendencias a largo plazo y fenómenos críticos como el cambio climático y la deforestación global [NASA Applied Sciences, 2023].

Principios Físicos de la Teledetección

Interacción Electromagnética La teledetección se fundamenta en la interacción de la radiación electromagnética (REM) con la superficie terrestre y la atmósfera [NASA Applied Sciences, 2023]. La REM, que abarca desde ondas de radio hasta rayos cósmicos, incluye regiones como microondas, infrarrojo, visible y ultravioleta. Diferentes materiales reflejan y absorben las ondas de REM en longitudes de onda específicas, generando una "firma espectral"única para cada tipo de material, como si se tratase de una huella dactilar [NASA Applied Sciences, 2023]. Por ejemplo, los pigmentos vegetales absorben luz visible (roja) pero reflejan intensamente infrarrojo cercano, mientras el agua absorbe longitudes largas (verde-rojo) más que las cortas (azul) [Asociación Española de Teledetección, 2025].

Absorción Atmosférica Durante el trayecto de la energía electromagnética desde el Sol hasta la Tierra y de regreso al sensor, gases atmosféricos como ozono (UV), dióxido de carbono (13-17,5[μm]) y vapor de agua (5,5-7[μm] y $>$27[μm]) absorben y dispersan parte significativa de la energía [NASA Applied Sciences, 2023]. Esta distorsión, aunque desafía el monitoreo superficial, constituye el principio fundamental para la teledetección de composición atmosférica y medición de contaminantes, donde las firmas espectrales de los gases se manifiestan en patrones de absorción/emisión específicos [iSE-Academy, 2025].

Clasificación Tecnológica y Ejemplos de Sistemas Actuales

Tipos de Sensores e Instrumentación Representativa La teledetección se clasifica primariamente según la fuente de energía utilizada para la adquisición de datos. A continuación se describen las dos categorías principales junto con ejemplos de misiones operativas modernas.

Sensores Pasivos Miden la energía radiante natural reflejada o emitida por el sistema Tierra-atmósfera, siendo la radiación solar reflejada la fuente más común [NASA Applied Sciences, 2023]. Estos instrumentos capturan variables biogeofísicas (como temperatura superficial, color del océano y vigor vegetal) operando principalmente en los rangos visible, infrarrojo cercano y térmico [Asociación Española de Teledetección, 2025].

Ejemplos actuales:

- Programa Landsat (NASA/USGS): La misión Landsat 9, lanzada en 2021, continúa un registro histórico de décadas, fundamental para observar cambios en el uso del suelo.
- Sentinel-2 (ESA): Parte del programa Copernicus, equipada con instrumentos multiespectrales (MSI) de alta resolución para el monitoreo de la vegetación y aguas costeras.
- MODIS y VIIRS: Sensores a bordo de satélites como Terra y Aqua, que proveen cobertura global diaria clave para modelos climáticos.

Sensores Activos Generan su propia fuente de energía para ïluminar"los objetivos, midiendo la energía retrodispersada. Esto les permite operar en condiciones diurnas o nocturnas y penetrar la atmósfera bajo diversas condiciones meteorológicas [iSE-Academy, 2025]. Destacan dos tecnologías principales:

- Radar (Radio Detection and Ranging): Utiliza ondas de radio (longitudes de $30[\mathrm{cm}]$ a $3[\mathrm{mm}]$) para detectar la geometría y rugosidad de objetos a larga distancia, atravesando obstáculos como niebla o nubes [NASA Applied Sciences, 2023].

  Ejemplo Operativo: La constelación Sentinel-1 emplea Radar de Apertura Sintética (SAR) en banda C, crucial para monitorear deformaciones milimétricas del terreno (interferometría) y derrames de petróleo.

- LiDAR (Light Detection and Ranging): Emplea pulsos láser para medir distancias basándose en el tiempo de retorno, generando nubes de puntos 3D de alta precisión para mapeo topográfico y altimetría [NASA Applied Sciences, 2023].

  Ejemplo Operativo: La misión GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) en la Estación Espacial Internacional y el satélite ICESat-2, diseñados para medir estructura forestal y elevación de hielos polares respectivamente.

La elección entre sensores pasivos y activos depende estrictamente de las condiciones ambientales (ej. nubosidad constante) y los requerimientos específicos de información, evidenciando la adaptabilidad tecnológica de la disciplina [iSE-Academy, 2025].

Resoluciones Fundamentales en Teledetección

Parámetros de Calidad del Dato Independientemente del tipo de sensor, la calidad y utilidad de la información obtenida dependen de cuatro resoluciones fundamentales [Asociación Española de Teledetección, 2025]:

- Espacial: Tamaño del área terrestre representada por un píxel (rango típico: $30[\mathrm{cm}]$ a $1000[\mathrm{m}]$). Menor tamaño de píxel implica mayor detalle pero reduce el área total cubierta por imagen.

- Espectral: Número y ancho de las bandas del espectro electromagnético que el sensor puede discriminar. Una alta resolución espectral (sensores hiperespectrales) permite identificar "firmas"únicas de materiales específicos.

- Radiométrica: Capacidad del sensor para discriminar diferencias sutiles en la intensidad de energía recibida, expresada en bits. Por ejemplo, un sistema de 12 bits (4096 niveles de gris) ofrece mayor sensibilidad al contraste que uno de 8 bits (256 niveles).

- Temporal: Frecuencia de revisita de una ubicación específica. Los satélites de órbita polar ofrecen cobertura global con revisitas de días o semanas, mientras que los geoestacionarios proporcionan mediciones cada pocos minutos pero con menor resolución espacial [NASA Applied Sciences, 2023].

Cuadro 1.5: Comparación de Tipos de Resolución y Aplicaciones [Asociación Española de Teledetección, 2025]

Resolución	Concepto Clave	Unidad/Ejemplo	Aplicaciones Típicas
Espacial	Nivel de detalle geométrico (tamaño de píxel).	Metros (ej. 0.5 m vs 30 m)	Planeación urbana, catastro (alta); Climatología global (baja).
Espectral	Capacidad de discriminar longitudes de onda.	N° y ancho de bandas (λ).	Agricultura de precisión, geología, salud de vegetación.
Radiométrica	Sensibilidad a variaciones de energía.	Bits (profundidad de color).	Detección de sombras sutiles, calidad del agua, turbidez.
Temporal	Frecuencia de adquisición de datos.	Intervalo de tiempo (revisita).	Monitoreo de incendios, inundaciones y evolución de cultivos.

Compromisos Técnicos y Limitaciones Reales La dificultad de lograr simultáneamente valores altos en las cuatro resoluciones implica que no existe un ”sensor universal” [Asociación Española de Teledetección, 2025]. Por ejemplo, una resolución espacial muy alta suele requerir un ancho de barrido menor, lo que afecta la resolución temporal. La selección de plataformas requiere equilibrios técnicos, frecuentemente solucionados mediante la fusión de datos (combinando lo mejor de varios sensores) para tener una visión completa del territorio [NASA Applied Sciences, 2023].

Esto también se refleja en la práctica al generar productos finales. El funcionamiento de los sistemas no es perfecto en el mundo real: factores externos, como las condiciones climáticas o la nubosidad, pueden obstruir la visión del sensor y modificar los valores esperados de la detección, afectando la confiabilidad del dato en ese momento específico.

Contexto actual y proyecciones

La teledetección atraviesa hoy una etapa de transformación radical, impulsada por la ”democratización”del acceso al espacio y a los datos. La situación actual hace convivir la observación puramente científica gubernamental junto a un ecosistema híbrido con fuerte participación privada (el llamado ”New Space” [Solar MEMS, 2024]). Hoy en día, el desafío ya no es solo capturar la imagen, sino gestionar volúmenes masivos de información para generar respuestas casi en tiempo real ante dinámicas globales y locales.

Este nuevo escenario se apoya en pilares tecnológicos que funcionan en conjunto:

- Computación en la Nube (Cloud Computing): Plataformas como Google Earth Engine o AWS permiten procesar petabytes de datos históricos sin necesidad de descargarlos, facilitando análisis temporales que antes tomaban meses en realizarse.

- Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV/Drones): Cubren el vacío entre la medición en terreno y el satélite, permitiendo resoluciones de centímetros para la agricultura de precisión o la inspección de infraestructura crítica.

Inteligencia Artificial y Big Data La integración de IA y Machine Learning ha sido el motor para manejar este volumen de información [Lee, 2025]. Estas herramientas han automatizado tareas complejas, como la detección de objetos, la clasificación de usos del suelo y el monitoreo ambiental predictivo. Actualmente, los algoritmos de Deep Learning no solo procesan datos en tierra, sino que optimizan el consumo energético a bordo de las naves y mejoran la precisión en la detección de contaminantes atmosféricos [Lee, 2025].

CubeSats y Miniaturización En cuanto al hardware, los CubeSats (satélites miniaturizados en órbita baja) han permitido un monitoreo ambiental continuo y rentable, rompiendo la dependencia de los grandes satélites tradicionales [Almalki, 2025]. A pesar de sus limitaciones físicas de tamaño, son extremadamente valiosos para estudios climáticos rápidos, gestión de desastres y validación de nuevas tecnologías [Almalki, 2025]. Su despliegue en çonstelaciones"(enjambres de satélites) permite reducir drásticamente los tiempos de revisita sobre un mismo punto.

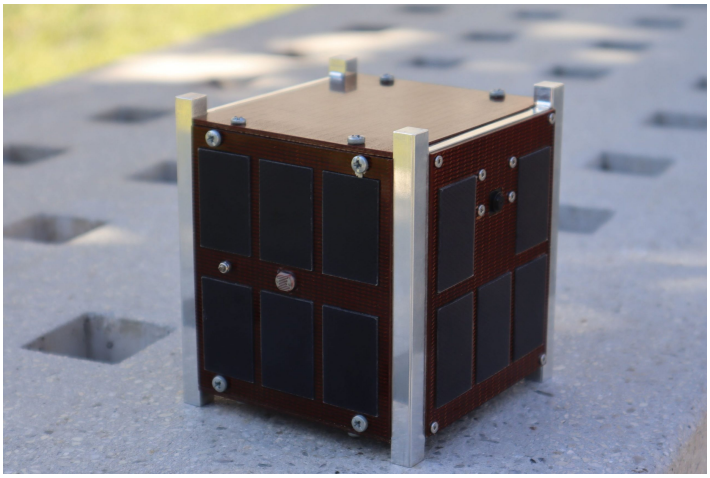


Figura 1.9: Nanosatélite desarrollado por CubeSat Team USM [Mateluna Cuadra, 2025]

1.2. Satélites para la detección de datos medioambientales

La monitorización del sistema terrestre desde el espacio se ha convertido en una herramienta indispensable para comprender la complejidad de los procesos climáticos y ambientales a escala global. A diferencia de las mediciones in-situ (en terreno), cuya cobertura es limitada, la tecnología satelital ofrece una visión sinóptica, continua y homogénea del planeta, permitiendo la detección precisa de variables críticas como la composición atmosférica, la dinámica oceánica y los cambios en la cobertura terrestre [NASA, 2025a,European Union, 2025b]. En la actualidad, las agencias espaciales han transitado de misiones puramente científicas hacia infraestructuras operativas robustas que sustentan la toma de decisiones políticas y económicas frente a desafíos globales como el cambio climático. A continuación, se analizan las principales arquitecturas satelitales desarrolladas por la Unión Europea y la NASA, detallando las especificaciones técnicas de sus misiones más relevantes.



Figura 1.10: Satélite de monitoreo NASA Landsat 5

Niveles de Procesamiento de Datos El flujo de datos satelitales se categoriza por su nivel de complejidad. Inicia con la señal cruda del sensor (L0) y su calibración (L1). Posteriormente, se derivan variables geofísicas concretas (L2) y finalmente se generan mapas globales promediados en tiempo y espacio (L3/L4) para el usuario final. En el contexto específico de variables térmicas, [Li et al., 2023] refina esta clasificación distinguiendo explícitamente entre productos de Nivel 2, definidos en la geometría original del sensor (swath), y productos de Nivel 3, los cuales son sometidos a procesos de remuestreo espacial y temporal en grillas uniformes. Asimismo, se introduce la categoría de Nivel 4, crítica para aplicaciones climatológicas, la cual se construye mediante el reanálisis de niveles inferiores y la fusión de múltiples sensores para generar registros continuos sin vacíos de información (gap-free), superando las limitaciones de discontinuidad espacial inherentes a la cobertura nubosa en sensores ópticos y térmicos.

Cuadro 1.6: Niveles de Procesamiento de Datos Satelitales (Adaptado de [Li et al., 2023])

Nivel	Descripción	Ejemplo/Producto
0	Datos crudos reconstruidos a resolución completa del instrumento.	Conteos digitales binarios (sin unidades físicas).
1B	Datos geolocalizados y calibrados radiométricamente.	Radiancia o Reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA).
2	Variables geofísicas derivadas a la misma resolución y geometría (swath) del píxel satelital.	Concentración de columnas de NO_2; Temperatura de Superficie (LST) instantánea.
3	Datos re-muestreados en grillas espaciales uniformes (mapas) y promediados temporalmente.	Mapas globales diarios o de 8 días de variables biofísicas (ej. MOD11A1).
4	Productos derivados de modelos o fusión de datos para eliminar vacíos espaciales y temporales (gap-free).	Mapas climáticos de LST mensuales interpolados o datos asimilados.

1.2.1. El Programa de la NASA (EOS/ESO)

Evolución y Estrategia del Programa



Del EOS al Observatorio del Sistema Terrestre El programa de Ciencias de la Tierra de la NASA ha evolucionado desde el Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de los años 90, enfocado en grandes plataformas multi-instrumentales como Terra y Aqua, hacia el actual Observatorio del Sistema Terrestre (ESO) [NASA Technical Reports Server, 2025]. Esta transición responde a la necesidad de comprender la Tierra como un sistema interconectado, integrando datos de la atmósfera, hidrosfera y biosfera. El programa actual se estructura en tres componentes: el segmento de vuelo (satélites), el programa de ciencias aplicadas (toma de decisiones) y el sistema de datos EOSDIS, que gestiona petabytes de información bajo una política de Çiencia Abierta"para maximizar el retorno social [St. Germain, 2025].

Áreas Focales y Estrategia Futura La estrategia de la NASA combina la continuidad de registros climáticos a largo plazo con la innovación tecnológica. Las misiones actuales y futuras se alinean con áreas focales críticas: ciclo del carbono, ciclo del agua, variabilidad climática, composición atmosférica y dinámica de la superficie. El futuro ESO implementará una arquitectura de misiones sinérgicas para crear una visión tridimensional del planeta, abordando variables designadas prioritarias como aerosoles, nubes y cambios de masa [National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018].

Misiones Clave de Monitoreo Terrestre

Landsat 9: Continuidad del Monitoreo Óptico Operada conjuntamente con el USGS, esta misión extiende un registro de más de 50 años de observación terrestre. Porta el sensor OLI-2 (óptico) y TIRS-2 (térmico), ofreciendo mejoras significativas en la resolución radiométrica (14 bits) para detectar detalles en zonas oscuras o costeras. Es fundamental para la agricultura, gestión forestal y recursos hídricos [U.S. Geological Survey, 2025].

Cuadro 1.7: Especificaciones Técnicas de Landsat 9

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Instrumentos	OLI-2 (Visible/SWIR) y TIRS-2 (Térmico)	[NASA Landsat Science, 2025a]
Bandas Espectrales	11 bandas (Visible, NIR, SWIR, Térmico)	[NASA Landsat Science, 2025b]
Resolución Espacial	15 m (Pancromática), 30 m (Multiespectral), 100 m (Térmico)	[U.S. Geological Survey, 2025]
Revisita	16 días (8 días en constelación con Landsat 8)	[U.S. Geological Survey, 2025]
Aplicaciones	Agricultura, deforestación, calidad del agua	[NASA, 2025c]

SWOT: Revolución en la Hidrología Global Lanzada en 2022 en colaboración con el CNES, la misión SWOT realiza el primer inventario global de agua dulce. Su instrumento KaRIn utiliza interferometría de radar en banda Ka para medir la elevación del agua en 2D (franjas de 50 km), superando la altimetría tradicional de perfil (1D). Permite observar ríos de 100 m de ancho y características oceánicas de sub-mesoescala [NASA SWOT, 2025a].

Cuadro 1.8: Características de la Misión SWOT

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Instrumento Principal	Interferómetro Radar KaRIn (Banda Ka)	[NASA Earthdata, 2025a]
Resolución	50 m (Tierra/Hidrología), 1 km (Océano)	[NASA Earthdata, 2025b]
Cobertura	Global entre 78°N y 78°S cada 21 días	[eoPortal, 2025d]
Innovación	Altimetría de franja ancha (120 km) vs perfilado nadir	[NASA SWOT, 2025a]
Aplicaciones	Inventario de agua dulce, dinámica oceánica fina	[NASA SWOT, 2025b]

PACE: Biología Oceánica y Atmósfera Misión hiperespectral lanzada en 2024 para estudiar el color del océano y los aerosoles. Su instrumento OCI mide el espectro continuo desde UV hasta NIR (pasos de 5 nm), permitiendo identificar tipos específicos de fitoplancton. Se complementa con polarímetros multi-angulares para caracterizar aerosoles y nubes [NASA PACE, 2025b].

Cuadro 1.9: Especificaciones del Instrumento OCI (PACE)

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Tecnología	Espectrómetro hiperespectral rotatorio	[NASA PACE, 2025a]
Rango Espectral	340 - 890 nm (continuo) + 7 bandas SWIR	[NASA PACE, 2025b]
Resolución Espacial	1 km en nadir	[NASA PACE, 2025a]
Revisita	Cobertura global cada 2 días	[NASA PACE, 2025b]
Objetivo	Biodiversidad oceánica, interacción aerosol-nube	[eoPortal, 2025c]

Suomi NPP: El Puente Operativo Actúa como enlace entre el programa EOS y la nueva generación JPSS. Su instrumento principal, VIIRS, es un radiómetro de 22 bandas que incluye una banda Día/Noche (DNB) única para monitorear luces nocturnas y actividades humanas. Es vital para la predicción meteorológica numérica y el monitoreo de desastres en tiempo casi real [NASA EOS, 2025b].

Cuadro 1.10: Instrumento VIIRS en Suomi NPP

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Bandas	22 bandas (5 Imagen, 16 Moderadas, 1 Día/Noche)	[NASA Earthdata, 2025e]
Resolución	375 m (Imagen), 750 m (Moderada/DNB)	[NASA Earthdata, 2025d]
Ancho de Barrido	3,040 km (cobertura global diaria sin huecos)	[Suomi NPP Atmosphere Team, 2025]
Aplicaciones	Calidad del aire, incendios, luces nocturnas	[Miller, 2013]

ICESat-2: Altimetría Láser de Precisión Utiliza la técnica de conteo de fotones para medir la elevación del hielo y la vegetación. Su instrumento ATLAS emite pulsos láser verde (532 nm) a 10 kHz, divididos en 6 haces, lo que permite medir no solo la altura sino también la pendiente del terreno con precisión milimétrica, esencial para el balance de masa de los casquetes polares y la biomasa forestal [NASA EOS, 2025a].

Cuadro 1.11: Especificaciones de ICESat-2 (ATLAS)

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Instrumento	Lidar ATLAS (Conteo de fotones)	[NASA, 2025d]
Configuración	6 haces (3 pares) a 532 nm (Verde)	[NASA, 2025b]
Frecuencia	10,000 pulsos/segundo (huella cada 70 cm)	[NASA EOS, 2025a]
Aplicaciones	Espesor de hielo marino, altura de dosel forestal	[National Snow and Ice Data Center, 2025]

TEMPO: Vigilancia Geoestacionaria Primer instrumento de la NASA dedicado a monitorear la calidad del aire sobre América del Norte desde una órbita geoestacionaria. A diferencia de los satélites polares que pasan una vez al día, TEMPO observa la evolución horaria de contaminantes como ozono, NO_2 y formaldehído, capturando la dinámica de la contaminación durante las horas pico de actividad humana [NASA, 2025e].

Cuadro 1.12: Especificaciones del Instrumento TEMPO

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Instrumento	Espectrómetro de rejilla UV/Visible	[NASA, 2025e]
Bandas Espectrales	UV (290-490 nm) y Visible (540-740 nm)	[NASA, 2025e]
Resolución	Espacial de pocos km^2; Temporal horaria (o 10 min en eventos especiales)	[NASA, 2025e]
Órbita	Geoestacionaria a 91° Oeste (sobre América del Norte)	[NASA, 2025e]
Aplicaciones	Calidad del aire (O_3, NO_2, H_2CO, aerosoles	[NASA, 2025e]

1.2.2. El Programa Copernicus EU

Visión general del programa

Orígenes y Objetivos El programa Copernicus, coordinado por la Unión Europea, representa la iniciativa de observación terrestre más ambiciosa a nivel global. Establecido bajo una visión de monitoreo ambiental autónomo, ha evolucionado hacia un ecosistema integrado que gestiona terabytes de datos diarios bajo una política de acceso "totalmente gratuita y abierta" [European Union, 2025a]. Su estructura operativa se fundamenta en tres componentes: el segmento espacial (satélites dedicados), el segmento de servicios (procesamiento de datos para áreas temáticas como atmósfera y cambio climático) y el componente in-situ (sensores terrestres y aéreos) [European Space Agency, 2025a].

La Constelación Sentinel El núcleo del componente espacial lo constituyen las misiones Sentinel, una familia de satélites diseñados específicamente para satisfacer las necesidades operativas de los servicios Copernicus. Cada misión porta tecnologías distintas —desde radar hasta espectrómetros ópticos— para asegurar una cobertura integral y continua de los parámetros geofísicos del planeta [Copernicus Programme, 2025].

Misiones Operativas y Especificaciones Técnicas

Sentinel-1: Imágenes de Radar en Banda C Esta misión consta de una constelación de dos satélites en órbita polar que operan día y noche, independientemente de las condiciones meteorológicas. Su instrumento principal es un Radar de Apertura Sintética (SAR) en banda C (5.405 GHz), esencial para el monitoreo de hielo marino, derrames de petróleo y deformaciones del terreno (interferometría) [eoPortal, 2025a].

Cuadro 1.13: Especificaciones Técnicas de Sentinel-1

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Instrumento	SAR en Banda C (C-SAR)	[eoPortal, 2025a]
Modos de Operación	Stripmap (SM), Interferometric Wide (IW), Extra Wide (EW), Wave (WV)	[eoPortal, 2025a]
Resolución Espacial	5 m (SM) hasta 100 m (EW)	[CEOS Database, 2025a]
Órbita	Heliosíncrona, altitud 693 km	[eoPortal, 2025a]
Revisita	12 días (1 satélite), 6 días (constelación)	[eoPortal, 2025a]
Aplicaciones	Hielo marino, subsidencia, inundaciones	[European Union, 2025a]

Sentinel-2: Monitorización Óptica de Alta Resolución Misión diseñada para el monitoreo de la vegetación, el suelo y las aguas costeras. Sus satélites gemelos (2A y 2B) portan el Instrumento Multi-Espectral (MSI), que captura datos en 13 bandas desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Sus bandas de "borde rojo"(red edge) son críticas para evaluar la salud de la vegetación [Copernicus, 2025].

Cuadro 1.14: Características del Instrumento MSI (Sentinel-2)

Banda Espectral	**Resolución**	**Aplicación Principal**
Visible (RGB) + NIR	10 m	Cartografía y uso de suelo [CEOS Database, 2025b].
Red Edge + SWIR	20 m	Estado de vegetación y humedad [Copernicus, 2025].
Aerosoles/Vapor	60 m	Corrección atmosférica [Copernicus, 2025].
Ancho de Barrido	290 km	Cobertura global cada 5 días [CEOS Database, 2025b].

Sentinel-3: Topografía y Color del Océano Misión multidimensional que integra instrumentos ópticos y de microondas para medir topografía de la superficie del mar, temperatura superficial (marina y terrestre) y color del océano. Es fundamental para la oceanografía operacional y la predicción climática [eoPortal, 2025b].

- OLCI: Instrumento de color del océano con 21 bandas espectrales.
- SLSTR: Radiómetro para temperatura superficial con precisión $< 0{,}3$ K.
- SRAL: Altímetro radar SAR para topografía oceánica.

Sentinel-5P: Precursor de Composición Atmosférica Lanzada en 2017, esta misión es vital para el monitoreo de la calidad del aire y el clima. Porta el instrumento TROPOMI, un espectrómetro que mapea gases traza como NO_2, O_3, SO_2 y CH_4. Inicialmente operando con una resolución de $3{,}5 \times 7$ km^2, su muestreo espacial fue mejorado en agosto de 2019 a $3{,}5 \times 5{,}5$ km^2, permitiendo una detección más precisa de fuentes de emisión pequeñas [European Space Agency, 2025d]. Actúa como puente entre la misión Envisat y el futuro Sentinel-5.



Figura 1.11: Satélite de monitoreo Copernicus EU Sentinel-5P

Cuadro 1.15: Parámetros de Medición de Sentinel-5P (TROPOMI)

Parámetro	**Detalle**	**Ref.**
Instrumento	Espectrómetro Hiperespectral TROPOMI	[European Space Agency, 2025d]
Bandas	UV, VIS, NIR, SWIR	[European Space Agency, 2025d]
Resolución	$5{,}5 \times 3{,}5$ km^2 (desde 2019; previamente $7 \times 3{,}5$ km^2)	[NASA Earthdata, 2025c]
Gases Detectados	O_3, NO_2, SO_2, CH_4, CO, Aerosoles	[European Space Agency, 2025d]
Frecuencia	Cobertura global diaria	[NASA Earthdata, 2025c]

Futuras Misiones y Expansión El programa contempla misiones adicionales para reforzar la vigilancia ambiental:

- Sentinel-4: Instrumento geoestacionario para el monitoreo horario de la calidad del aire sobre Europa [European Space Agency, 2025c].
- Sentinel-5: Misión de órbita polar dedicada al monitoreo de composición atmosférica a largo plazo, complementando a S5P [Sentinel Online, 2025].
- Sentinel-6: Altímetro de referencia para la continuidad del registro del nivel del mar hasta 2030 [NASA JPL, 2025].

1.2.3. Contraste de Programas y Selección de Fuente de Datos

Comparativa Técnica: Copernicus vs. NASA EOS

A pesar de compartir el objetivo de monitorear el sistema terrestre, los programas Copernicus (UE) y NASA (EE. UU.) presentan enfoques distintos. Mientras Copernicus prioriza la continuidad operativa mediante familias de satélites estandarizados (Sentinels) para servicios públicos, la NASA se enfoca en la innovación científica y la exploración de nuevas variables climáticas mediante misiones especializadas. La Tabla 1.16 detalla estas diferencias en misiones homólogas.

Cuadro 1.16: Contraste Técnico: Misiones Sentinel (Copernicus) vs. NASA EOS/ESO

Dominio	Copernicus (UE)	NASA (EE. UU.)
Atmósfera (Global)	**Sentinel-5P (TROPOMI)** Especializado en calidad del aire. Resolución espacial ultra-alta ($7 \times 3{,}5$ km^2) para gases traza como NO_2 y CH_4 [European Space Agency, 2025d].	**Suomi NPP (OMPS/VIIRS)** Enfoque meteorológico y climático. Resolución menor para gases, pero incluye perfiles verticales y balance de radiación [NASA EOS, 2025b].
Superficie Óptica	**Sentinel-2 (MSI)** 13 bandas. Alta frecuencia de revisita (5 días). Incluye bandas *red-edge* para agricultura [Copernicus, 2025].	**Landsat 9 (OLI-2/TIRS-2)** 11 bandas. Revisita de 8 días (con L8). Incluye **sensores térmicos** (TIRS) esenciales para estrés hídrico [U.S. Geological Survey, 2025].
Atmósfera (GEO)	**Sentinel-4 (UVN)** Instrumento a bordo de satélites MTG-S. Monitoreo horario exclusivo sobre Europa [European Space Agency, 2025c].	**TEMPO** Carga útil en satélite comercial. Monitoreo horario exclusivo sobre Norteamérica [NASA, 2025e].
Océano y Color	**Sentinel-3 (OLCI)** 21 bandas multiespectrales. Continuidad operativa para oceanografía física y color del mar [eoPortal, 2025b].	**PACE (OCI)** **Hiperespectral** (UV a NIR continuo). Capaz de distinguir especies de fitoplancton (biodiversidad) [NASA PACE, 2025b].
Radar / Agua	**Sentinel-1 (C-SAR)** Radar de Apertura Sintética. Imágenes operativas día/noche para hielo y terreno [eoPortal, 2025a].	**SWOT (KaRIn)** Interferometría Radar. Primer inventario global de elevación de agua dulce (ríos/lagos) [NASA SWOT, 2025a].

Definición de Necesidades y Selección del Instrumento

Analizando los objetivos planteados en esta investigación, se requiere una fuente de datos con cobertura global y una resolución espacio-temporal lo suficientemente fina para identificar focos de alta concentración de NO_2 en diversas zonas del país.

Si bien las misiones geoestacionarias como TEMPO ofrecen una excelente resolución temporal, su cobertura limitada al territorio norteamericano impide su uso en este trabajo. Por otro lado, la misión Suomi NPP (instrumento OMPS) se presenta como una alternativa de cobertura global, pero debe ser descartada por dos factores críticos: primero, su resolución espacial es insuficiente para detectar variaciones a escala urbana; y segundo, el gas objetivo (NO_2) no se encuentra disponible operativamente dentro de su gama de productos de acceso directo para esta investigación [NASA EOS, 2025b].

En consecuencia, se ha seleccionado al satélite Sentinel-5P del programa Copernicus como la fuente primaria de datos. Su instrumento principal, TROPOMI, se sitúa a la vanguardia tecnológica del monitoreo atmosférico desde órbita baja, ofreciendo una resolución espacial de $7 \times 3{,}5$ km^2 (optimizada a $5{,}5 \times 3{,}5$ km^2 desde agosto de 2019). Esta capacidad permite al sensor generar y entregar productos de datos independientes para las columnas troposférica y estratosférica, lo cual es fundamental para aislar directamente las concentraciones de origen antropogénico en superficie sin la interferencia de la capa superior.



Figura 1.12: Esquema de separación de columnas atmosféricas en productos TROPOMI.

Adicionalmente, la política de datos abiertos del programa Copernicus y la disponibilidad de estos productos de Nivel 2, validados geofísicamente, garantizan tanto la viabilidad técnica como la reproducibilidad de los análisis propuestos.

1.3. Estudios previos del Monitoreo Satelital de NO_2 superficial

Para buscar una solución a la problemática, es necesario revisar la literatura disponible para encontrar propuestas respaldadas y así generar alternativas, ampliando el espectro de información sobre el tópico tratado. Dado que los objetivos de esta investigación plantean la obtención y procesamiento de datos satelitales de NO_2 para elaborar bases de datos de datos superficiales independientes de la toma de muestras en terreno, se analizaran documentos que hayan abordado y tratado dicha hipótesis con resultados que permitan trazar una ruta de este trabajo.

Space-based inference of surface NO2 concentrations in megacities with TROPOMI observations and machine learning - Hervé Petetin junto a Albert Soret Miravet, Carlos Pérez García-Pando, Carlos Gomez Gonzalez and Kim Serradell

Es importante destacar que en Chile no se han realizado estudios de esta índole de forma interna. Sin embargo, en 2020, en el contexto de la ϕ-week del Centro Nacional de Supercomputación ubicado en Barcelona, Hervé Petetin junto a Albert Soret Miravet, Carlos Pérez García-Pando, Carlos Gomez Gonzalez and Kim Serradell, realizó una presentación titulada ”Space-based inference of surface NO2 concentrations in megacities with TROPOMI observations and machine learning”. En ella se propuso la obtención y transformación de datos satelitales obtenidos desde Sentinel-5P para las regiones Metropolitana de Santiago y de Valparaíso para 2019:

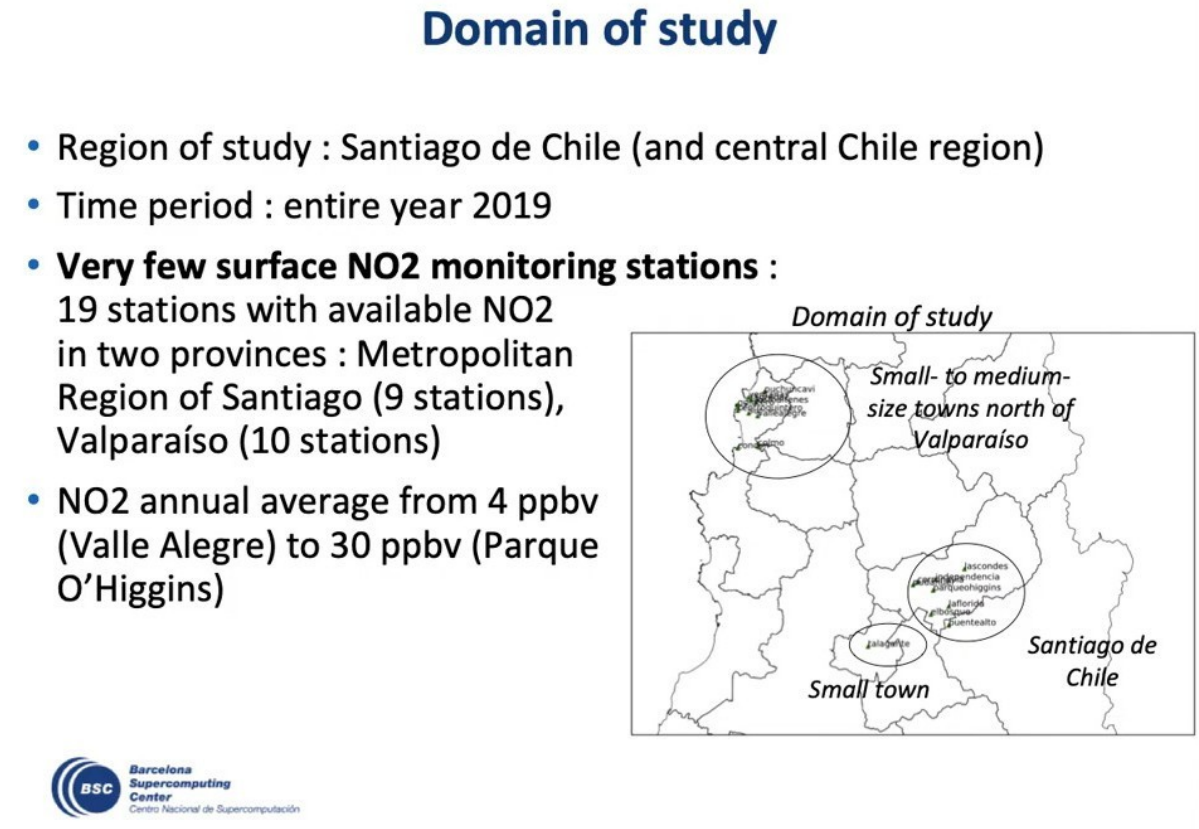
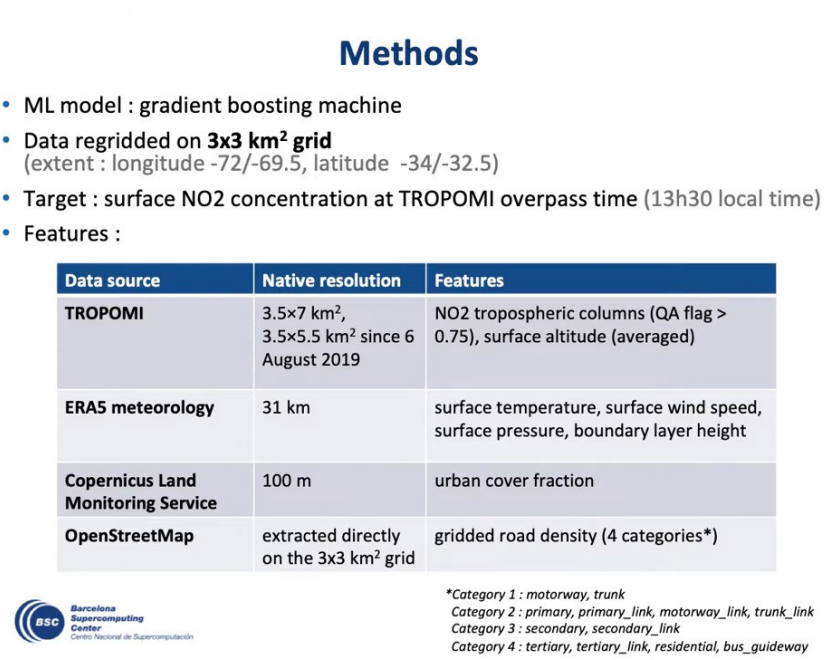


Figura 1.13: Diapositiva 4: Dominio de estudio [Petetin et al., 2020].

El procesamiento fue realizado mediante el entrenamiento de una inteligencia artificial cuya base de datos contenía la siguiente información:



Methods

- ML model : gradient boosting machine
- Data regridded on **3x3 km² grid**
  (extent : longitude -72/-69.5, latitude -34/-32.5)
- Target : surface NO2 concentration at TROPOMI overpass time (13h30 local time)
- Features :

Data source	Native resolution	Features
TROPOMI	3.5×7 km², 3.5×5.5 km² since 6 August 2019	NO2 tropospheric columns (QA flag > 0.75), surface altitude (averaged)
ERA5 meteorology	31 km	surface temperature, surface wind speed, surface pressure, boundary layer height
Copernicus Land Monitoring Service	100 m	urban cover fraction
OpenStreetMap	extracted directly on the 3x3 km² grid	gridded road density (4 categories*)

Barcelona Supercomputing Center
Centro Nacional de Supercomputación

*Category 1 : motorway, trunk
Category 2 : primary, primary_link, motorway_link, trunk_link
Category 3 : secondary, secondary_link
Category 4 : tertiary, tertiary_link, residential, bus_guideway

Figura 1.14: Diapositiva 7: Parámetros utilizados para la transformación [Petetin et al., 2020].

Una vez obtenidos los resultados, fue posible visualizar la concentración de NO_2 a través de los siguientes mapas de calor:

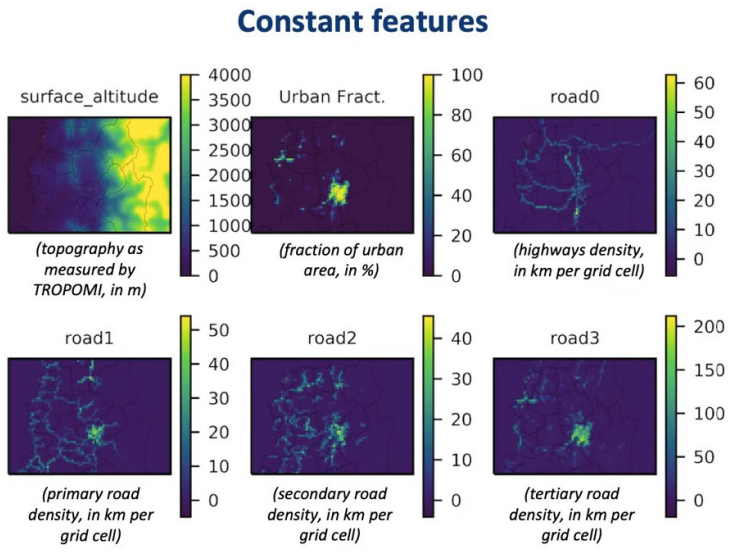


Figura 1.15: Diapositiva 8: Características recurrentes [Petetin et al., 2020].

resaltando aspectos como la topografía del área de interés, la fracción de urbanismo y rutas viales más utilizadas. Resultando en mapas de visualización de trazas de emisiones vehiculares.

Como datos de contraste se utilizaron registros en terreno realizados por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) realizando análisis cuantitativos estudiando la correlación entre muestras para validar la efectividad del modelo.

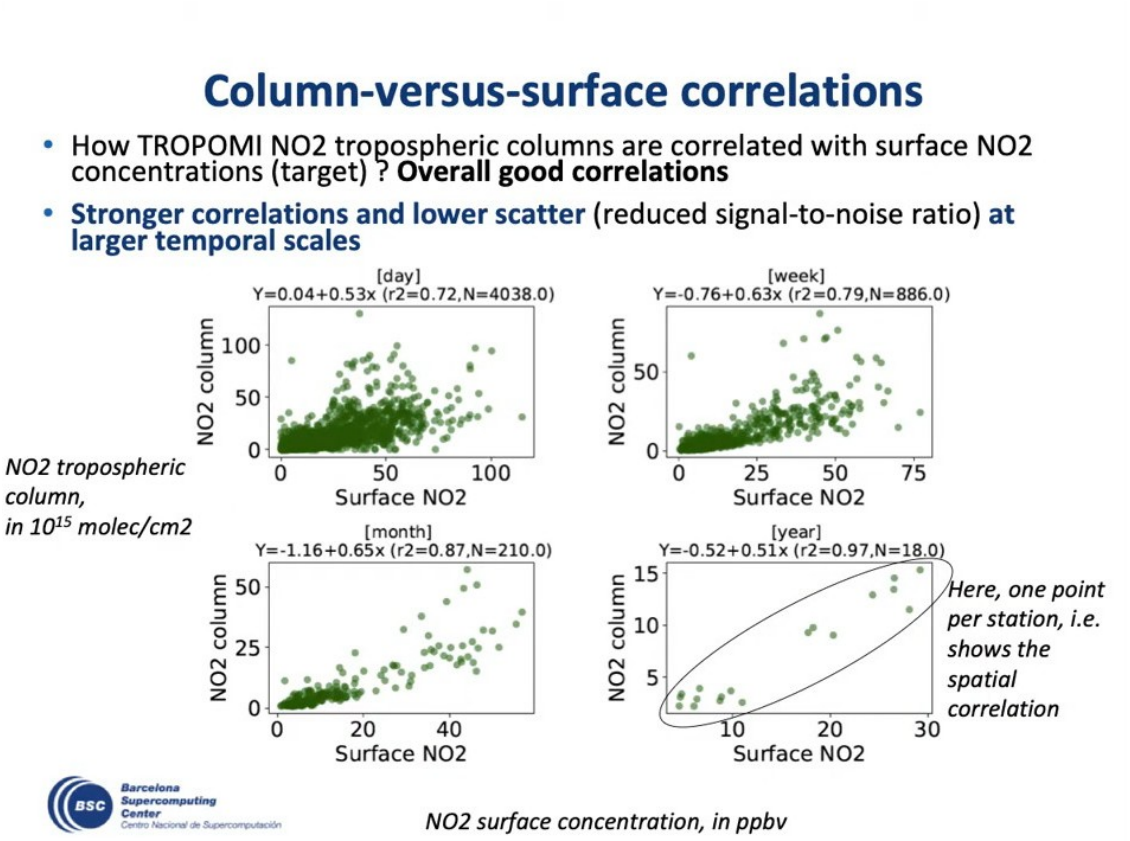


Figura 1.16: Diapositiva 9: Correlación columna-vs-superficie [Petetin et al., 2020].

Dichos análisis comparativos arrojaron resultados que evidencian una fuerte dependencia entre la precisión del modelo y la escala temporal de las mediciones. Si bien se obtuvo una correlación general positiva, se observó que la relación señal-ruido mejora sustancialmente al aplicar promedios temporales más amplios; mientras que el coeficiente de determinación (R^2) para las estimaciones diarias fue de 0,72, este indicador aumentó progresivamente a 0,79 a escala semanal y 0,87 a escala mensual, alcanzando un ajuste casi perfecto de $R^2 = 0,97$ al analizar los promedios anuales. Asimismo, se detectó que la variabilidad estacional influye en el desempeño del modelo, el cual tiende a mostrar mejores correlaciones durante los meses de primavera y verano (con mayores niveles de NO_2, reduciendo su precisión durante los meses más fríos de otoño e invierno.

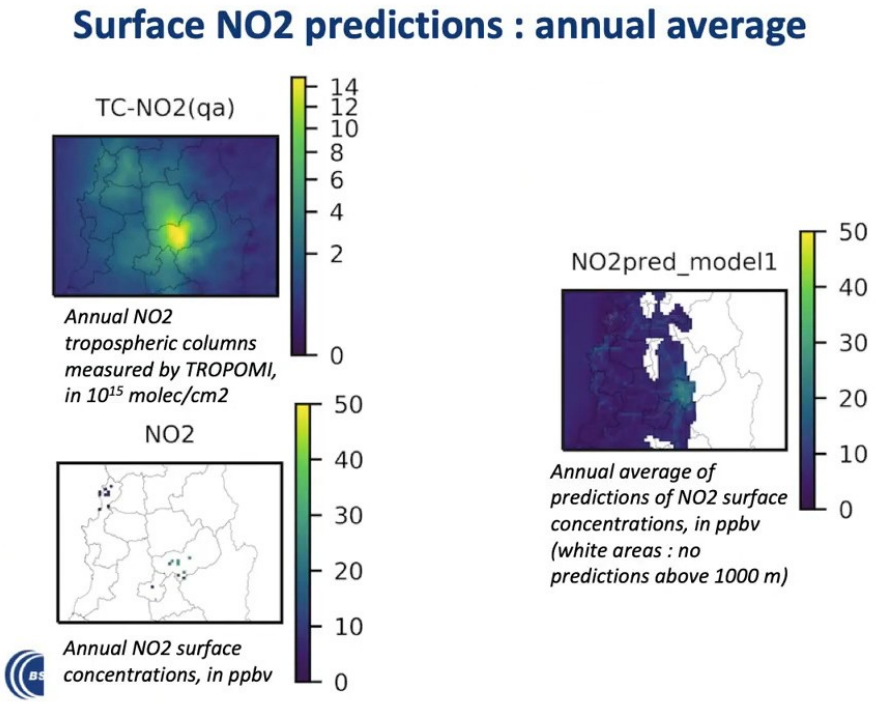


Figura 1.17: Diapositiva 13: Predicción superficial NO_2: promedio anual [Petetin et al., 2020].

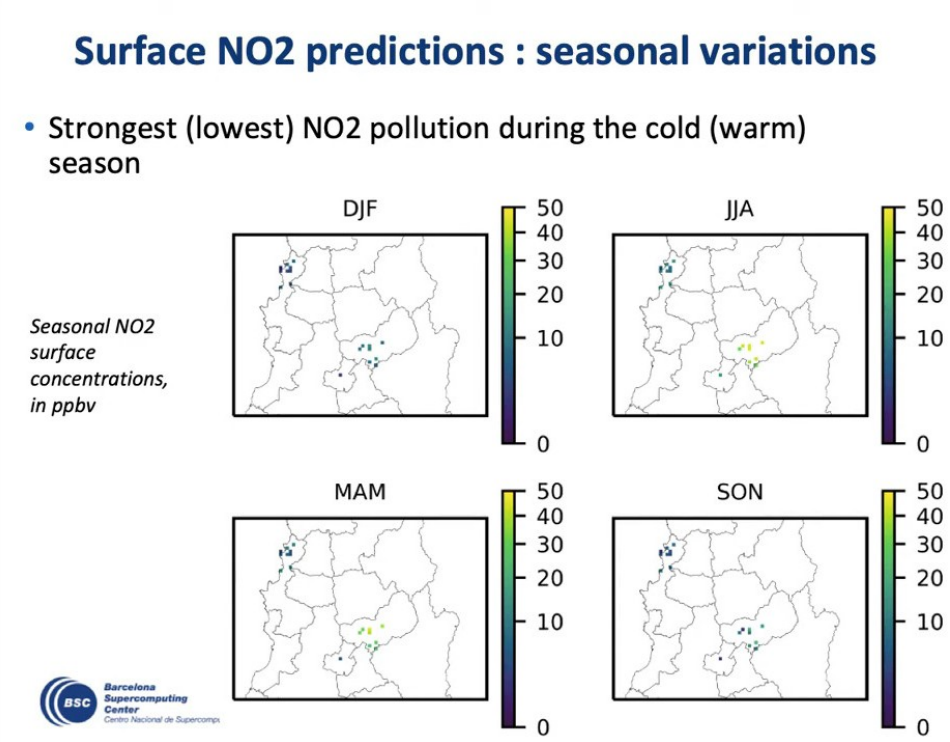


Figura 1.18: Diapositiva 14: Predicción superficial NO_2: variación estacional 1 [Petetin et al., 2020].

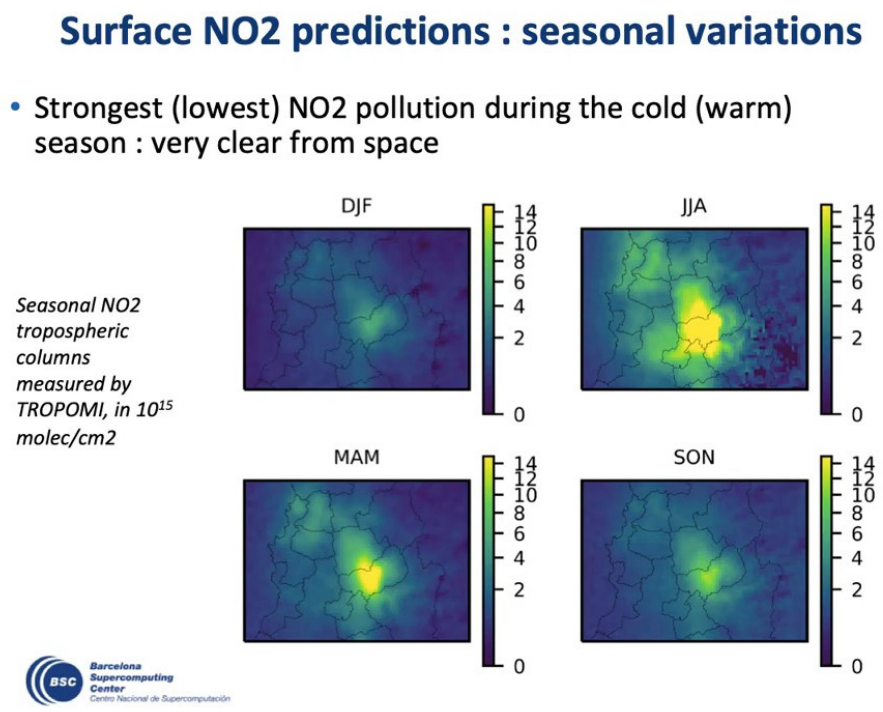


Figura 1.19: Diapositiva 15: Predicción superficial NO_2: variación estacional 2 [Petetin et al., 2020].

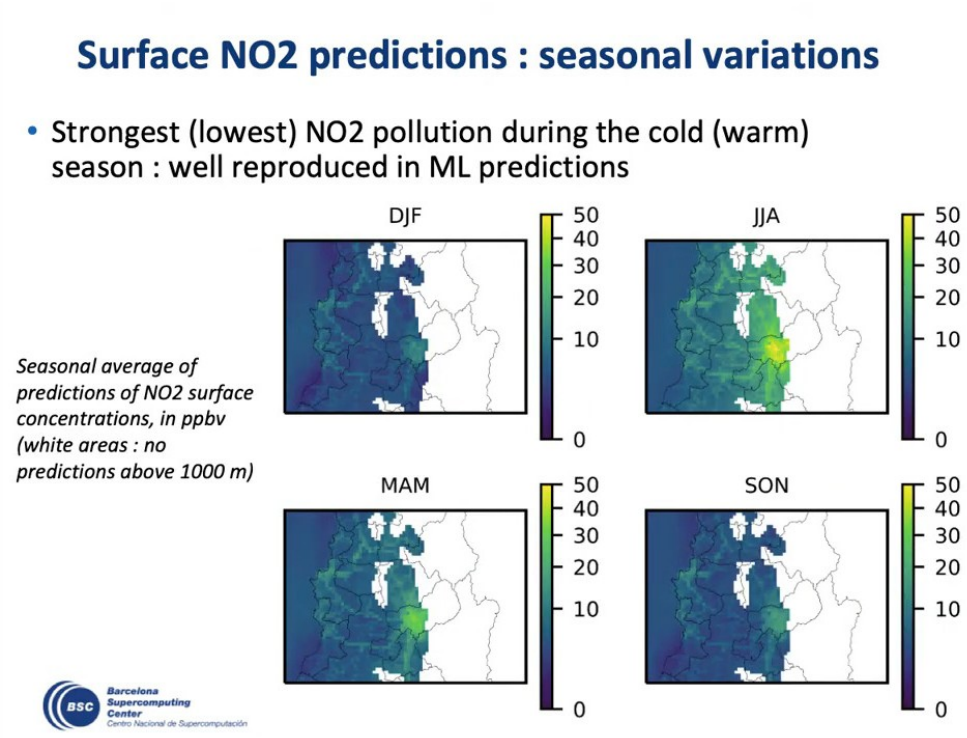


Figura 1.20: Diapositiva 16: Predicción superficial NO_2: variación estacional 3 [Petetin et al., 2020].

Potencial de TROPOMI para entender las variaciones espaciotemporales en el NO2 superficial y sus dependencias del uso del suelo en la Península Ibérica. - Hervé Petetin, Marc Guevara1, Steven Compernolle, Dene Bowdalo, Pierre-Antoine Bretonnière, Santiago Enciso, Oriol Jorba, Franco Lopez, Albert Soret y Carlos Pérez García-Pando

Metodología y Consistencia de Datos Un estudio reciente realizado por Petetin et al. (2022) evaluó el potencial del instrumento TROPOMI para caracterizar la variabilidad del NO_2 sobre la Península Ibérica durante el periodo 2018-2021. Para garantizar la consistencia temporal de las observaciones y evitar sesgos introducidos por cambios en las versiones del procesador operativo, se utilizó el producto reprocesado "PAL"(Product Algorithm Laboratory), complementado con inventarios de emisiones antropogénicas y de suelo [Petetin et al., 2022]. El estudio abordó la limitación intrínseca de la cobertura de nubes, reportando una disponibilidad de datos que oscila entre el 30-45 % en meses húmedos y el 70-80 % durante el verano, siendo esta cobertura suficiente para capturar la dinámica de la contaminación [Petetin et al., 2022].

Correlación con Mediciones In-Situ Uno de los hallazgos centrales para la validación de la teledetección fue la correlación entre las columnas troposféricas de NO_2 ($TrC - NO_2$) medidas por el satélite y las concentraciones superficiales registradas por las estaciones de monitoreo. Se observó una correlación razonablemente alta, con coeficientes de Pearson (PCC) situados entre 0.7 y 0.8, mejorando la consistencia a medida que se ampliaban las ventanas temporales de promedio [Petetin et al., 2022]. Estos resultados validan la capacidad de TROPOMI para representar los niveles de contaminación a nivel de superficie, a pesar de las diferencias en la representatividad espacial entre un píxel satelital y una estación puntual.

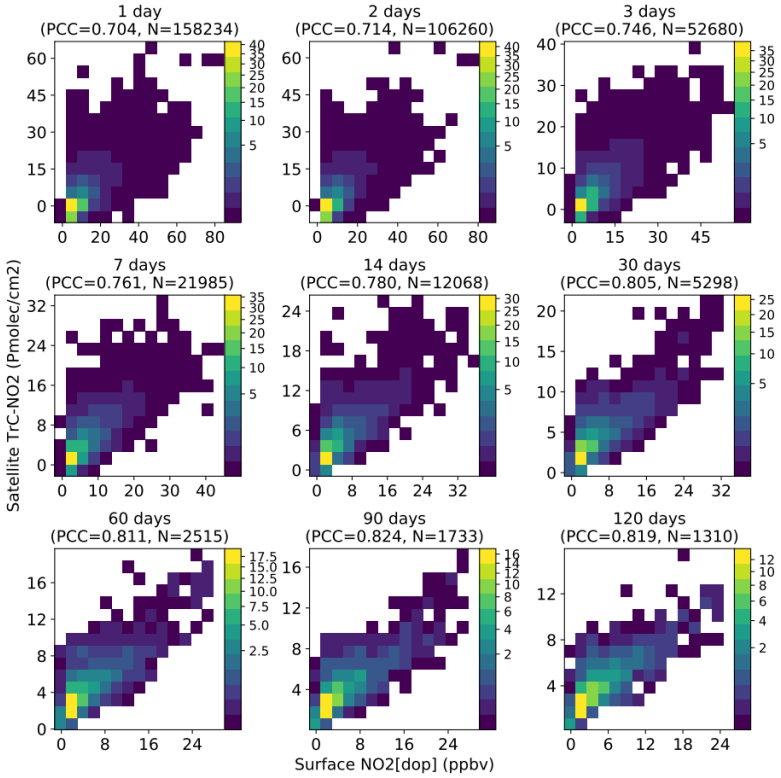


Figura 1.21: Diagramas de dispersión de densidad entre las columnas troposféricas de TROPOMI ($TrC - NO_2$) y las concentraciones superficiales de NO_2 al momento del paso del satélite. Adaptado de [Petetin et al., 2022].

Efecto Fin de Semana y Urbanización El análisis permitió cuantificar el ”efecto fin de semana”(la reducción de NO_2 debido a la disminución de la actividad humana). Se registró una reducción de las columnas de NO_2 de entre un 30 % y un 40 % en las áreas más urbanizadas, en concordancia con los datos de superficie [Petetin et al., 2022]. Es importante destacar que, gracias a la alta resolución espacial de TROPOMI, se identificó que este efecto no alcanza su máximo en los centros históricos de ciudades como Madrid o Barcelona, sino en sus periferias suburbanas, lo que sugiere una mayor contribución relativa del tráfico de conmutación a las emisiones totales en esas zonas [Petetin et al., 2022].

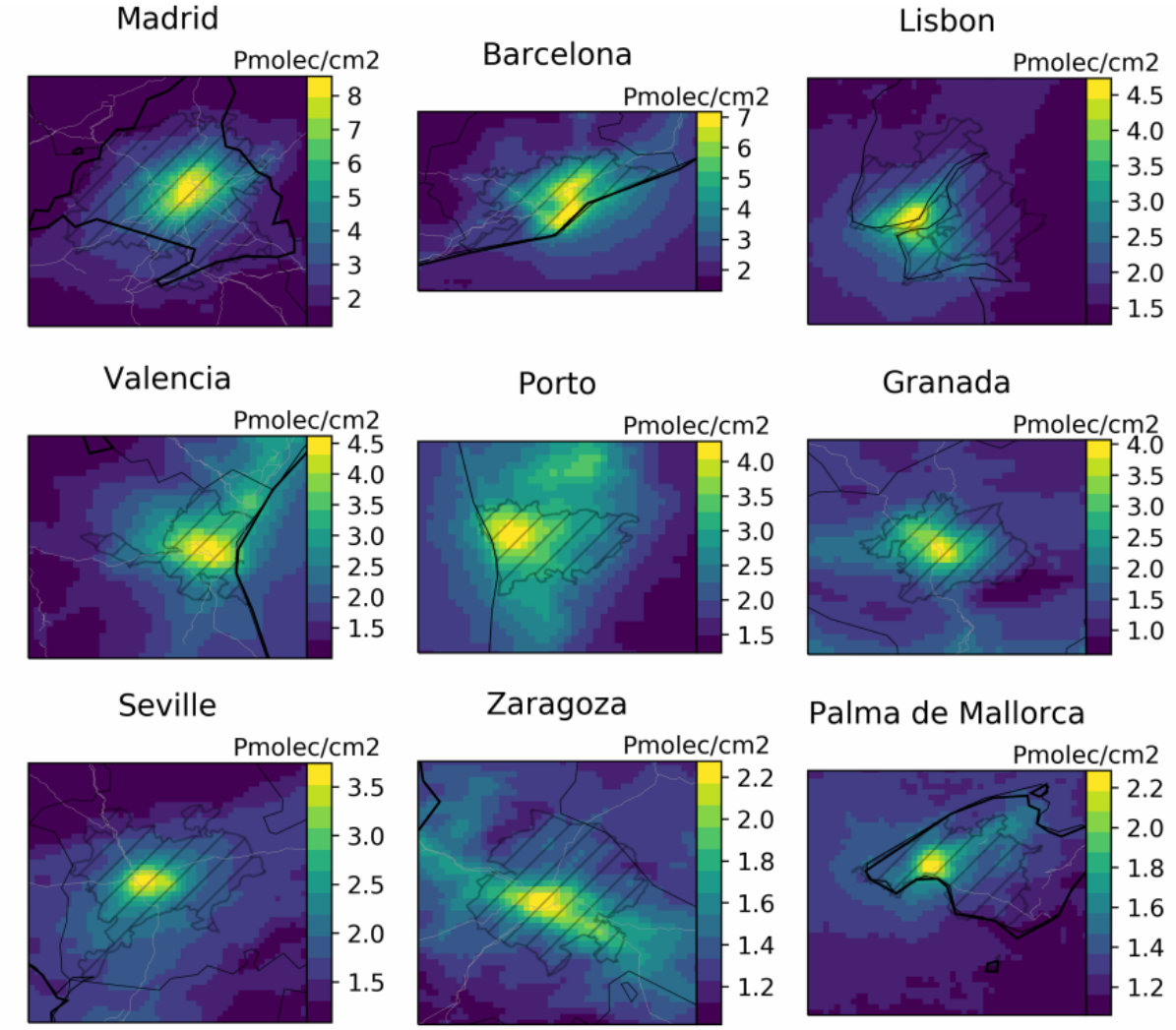


Figura 1.22: Promedio de NO_2 troposférico detectado por TROPOMI sobre las principales áreas urbanas funcionales de la Península Ibérica. Adaptado de [Petetin et al., 2022].

Fuentes Naturales y Eventos Anómalos Más allá de las emisiones urbanas, el estudio demostró la sensibilidad del satélite para detectar fuentes difusas y eventos atípicos. Por un lado, se observó un incremento de NO_2 en áreas agrícolas durante los meses de junio y julio, atribuible a emisiones naturales de NO desde el suelo [Petetin et al., 2022]. Por otro lado, se analizó el impacto de la tormenta de nieve ”Filomena”en Madrid (enero 2021), donde TROPOMI registró niveles históricos de contaminación (63[Pmolec/cm^2]) a pesar de la drástica reducción del tráfico, evidenciando el papel crítico de las emisiones residenciales por calefacción bajo condiciones de estabilidad atmosférica [Petetin et al., 2022].

Análisis de datos satelitales de concentración de NO_2 en ambientes urbanos. Aplicación a ciudades de España. - Carlos Morillas López

Metodología de Intercomparación En el contexto nacional, una investigación reciente desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid abordó la validación de los productos de NO_2 troposférico de Sentinel-5P en las principales áreas metropolitanas de España. El estudio se centró en analizar la coherencia entre los datos de la columna troposférica vertical (VCD_{trop}) del sensor TROPOMI y las concentraciones superficiales registradas por las redes de calidad del aire in situ. Para garantizar la comparabilidad temporal, se aplicó una metodología de filtrado que restringió el análisis a la ventana horaria de paso del satélite (12:00 - 16:00 hora local), eliminando valores atípicos y considerando únicamente píxeles con un índice de calidad (qa_value) superior a 0.75 [Morillas López, 2024].

Correlación y Tipología de Estaciones Los resultados en la Comunidad de Madrid revelaron una fuerte correlación lineal entre ambas fuentes de datos, obteniendo un coeficiente de Pearson (r) de 0,81 para los promedios diarios coincidentes. Sin embargo, el estudio destacó una disparidad significativa en función de la tipología del entorno: mientras que en zonas urbanas y suburbanas la correlación se mantuvo robusta ($r = 0{,}79$), en entornos rurales descendió notablemente ($r = 0{,}52$). Esto sugiere que TROPOMI es altamente eficaz para detectar las plumas de contaminación persistentes sobre los núcleos urbanos, pero pierde sensibilidad en áreas de fondo con concentraciones bajas y orografía compleja [Morillas López, 2024].

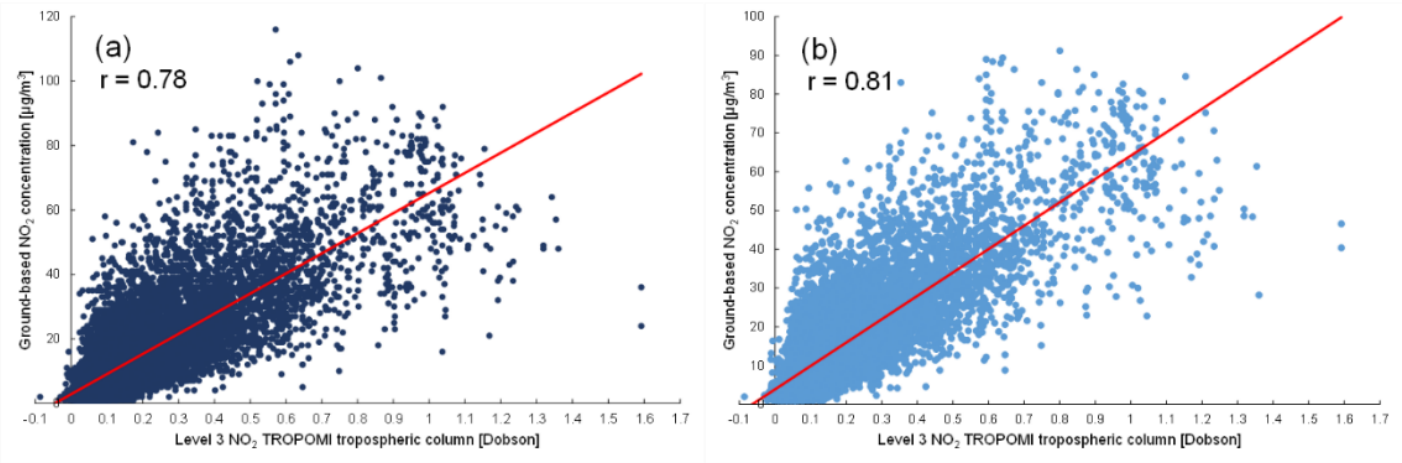


Figura 1.23: Diagrama de dispersión entre el NO_2 troposférico de TROPOMI (Nivel-3) y las observaciones in situ en la Comunidad de Madrid (2022). (a) Datos instantáneos al paso del satélite; (b) Datos promediados en la ventana 12:00-16:00. Adaptado de [Morillas López, 2024].

Influencia de la Meteorología y la Topografía Un hallazgo crítico de esta investigación fue la identificación de la velocidad del viento como el principal factor limitante para la teledetección del NO_2 a nivel de superficie. Al extender el análisis a ciudades costeras, se observó que la correlación disminuía conforme aumentaba la velocidad promedio del viento y la dispersión atmosférica. Madrid, situada en una cuenca con menor ventilación (velocidad media $1{,}34$ m/s), presentó una correlación superior ($r = 0{,}86$) en comparación con Valencia ($r = 0{,}68$, $2{,}97$ m/s) y Barcelona ($r = 0{,}65$, $8{,}04$ m/s). Esto confirma que la estabilidad atmosférica es un prerrequisito clave para asumir una relación directa entre la columna vertical medida por el satélite y la concentración que respira la población [Morillas López, 2024].

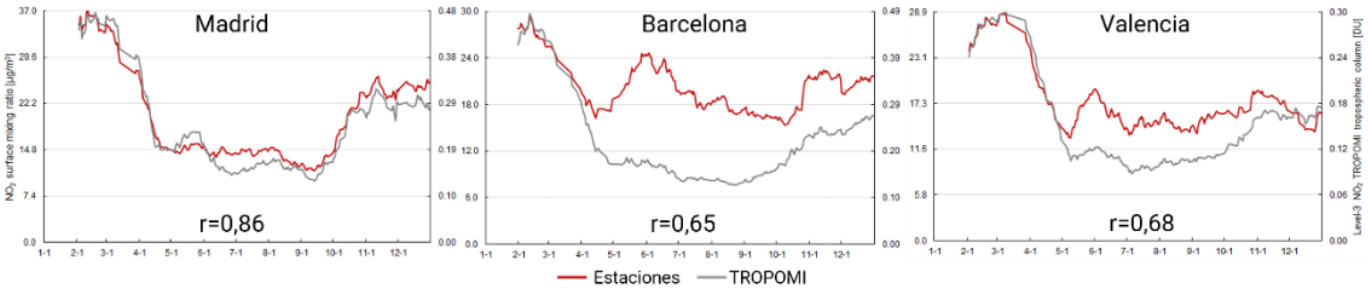


Figura 1.24: - Media móvil de 30 días de la concentración de NO2 observada en superficie (rojo) y por satélite (gris) en Madrid, Barcelona y Valencia, y coeficientes de correlación entre ambas series de datos [Morillas López, 2024].

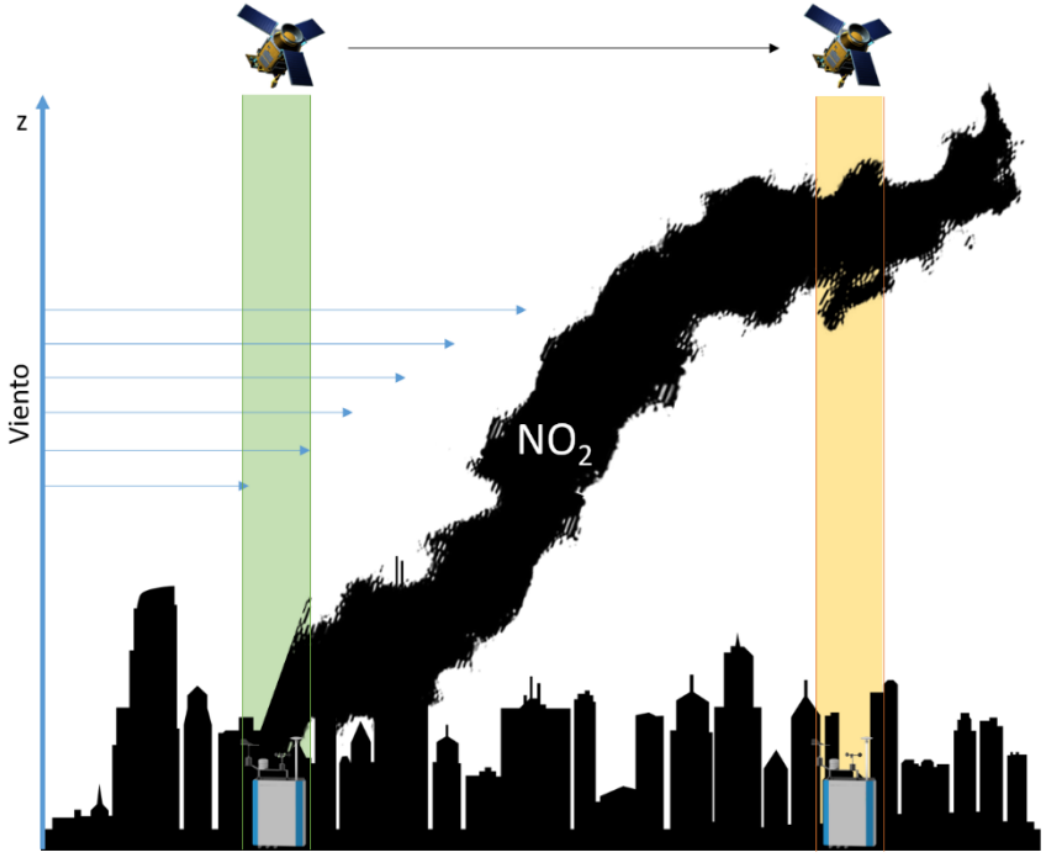


Figura 1.25: Influencia del viento sobre la correspondencia entre los datos de NO2 medido por las estaciones (superficie) y por satélite (columna) [Morillas López, 2024].

Detección de Patrones y Políticas Públicas Más allá de la validación numérica, el estudio demostró la utilidad operativa de Sentinel-5P para la evaluación de políticas públicas. Las imágenes satelitales permitieron caracterizar la distribución estacional del NO_2 (con máximos en invierno debido a la calefacción y mayor vida útil del gas) e identificar el impacto de medidas de restricción de tráfico como la Zona de Bajas Emisiones (Madrid Central) y el confinamiento por COVID-19. A pesar de la resolución limitada para detectar gradientes micro-urbanos, el satélite capturó con éxito las variaciones macroscópicas de la contaminación en respuesta a cambios en la movilidad humana [Morillas López, 2024].

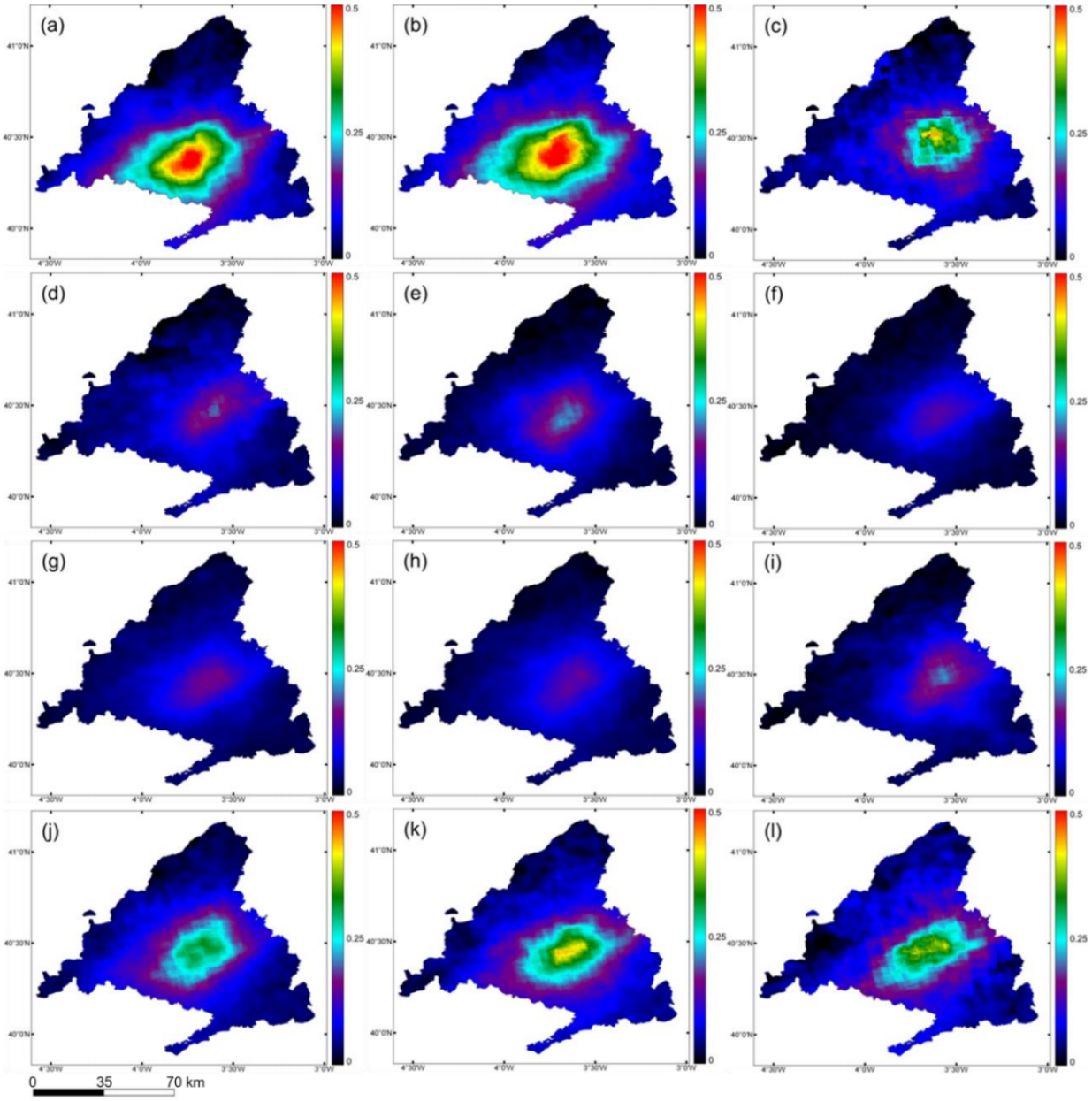


Figura 1.26: Mapas mensuales de la columna troposférica de NO_2 sobre Madrid (2022), evidenciando la variabilidad estacional y la concentración de la contaminación en el centro urbano durante los meses fríos. Adaptado de [Morillas López, 2024].

Cuadro 1.17: Resumen de Correlaciones In-Situ vs. Satélite en Ciudades Españolas (2022) [Morillas López, 2024]

Ciudad	**Correlación** (r)	**Viento Medio**	**Factor Condicionante Principal**
Madrid	0.86	1.34 m/s	Estabilidad atmosférica y orografía de cuenca favorecen la acumulación y detección.
Valencia	0.68	2.97 m/s	Dispersión moderada por brisas costeras.
Barcelona	0.65	8.04 m/s	Alta dispersión por vientos intensos, dificultando la relación directa superficie-columna.

Inferencia de concentraciones de dióxido de nitrógeno a nivel del suelo con alta resolución espacial aplicada al instrumento satelital TROPOMI - Matthew J Cooper

Desafíos en la Inferencia de NO_2 Superficial Históricamente, las estimaciones de NO_2 a nivel de suelo derivadas de satélites presentaban un sesgo negativo sistemático respecto a las mediciones in-situ. Cooper et al. (2020) demostraron que este error no se debía únicamente a la resolución espacial de los sensores previos (como OMI), sino a imprecisiones en las suposiciones sobre la mezcla vertical dentro de la capa límite atmosférica. Para abordar esto, desarrollaron un nuevo algoritmo que utiliza la alta resolución de TROPOMI para informar y ajustar dinámicamente el perfil vertical de la columna, permitiendo distinguir mejor entre concentraciones de fondo y penachos de contaminación localizados [Cooper et al., 2020].

Mejora en la Precisión y Validación La aplicación de este nuevo algoritmo sobre Norteamérica reveló una mejora sustancial en la concordancia con las redes de monitoreo terrestre (EE. UU. y Canadá). Al comparar las concentraciones inferidas por TROPOMI con las observaciones de superficie, el nuevo método logró corregir la subestimación histórica, elevando la pendiente de la regresión de 0.46 (con el método estándar) a 0.93, y manteniendo una alta correlación ($r = 0{,}72$). Esto confirma que la combinación de la resolución fina de Sentinel-5P con algoritmos de mezcla vertical mejorados permite cuantificar la contaminación urbana con una exactitud sin precedentes [Cooper et al., 2020].

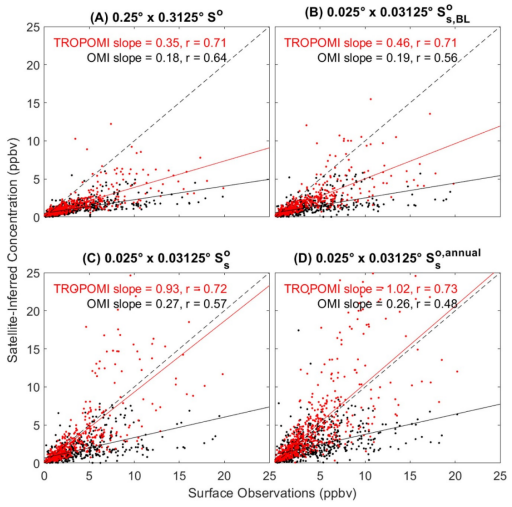


Figura 1.27: Comparación de concentraciones superficiales anuales inferidas por satélite vs. observaciones in situ. (B) Método estándar asumiendo capa límite uniforme; (C) Nuevo algoritmo desarrollado utilizando la tasa de muestreo de TROPOMI, mostrando una reducción drástica del sesgo (pendiente cercana a 1). Adaptado de [Cooper et al., 2020].

Resolución Espacial e Impacto en Salud La capacidad de TROPOMI para resolver espacialmente gradientes de contaminación quedó patente al compararlo con su predecesor, OMI. Mientras que los sensores anteriores solo detectaban señales difusas sobre grandes áreas metropolitanas, TROPOMI permitió identificar corredores industriales, autopistas interestatales y núcleos urbanos menores que antes pasaban desapercibidos. Esta mayor fidelidad tiene implicaciones directas en la evaluación de la salud pública: las estimaciones basadas en TROPOMI indicaron que la población expuesta a niveles de NO_2 superiores a los estándares de la OMS tres veces mayor de lo que sugerían los registros satelitales previos, subrayando la importancia de la alta resolución para una gestión ambiental efectiva [Cooper et al., 2020].

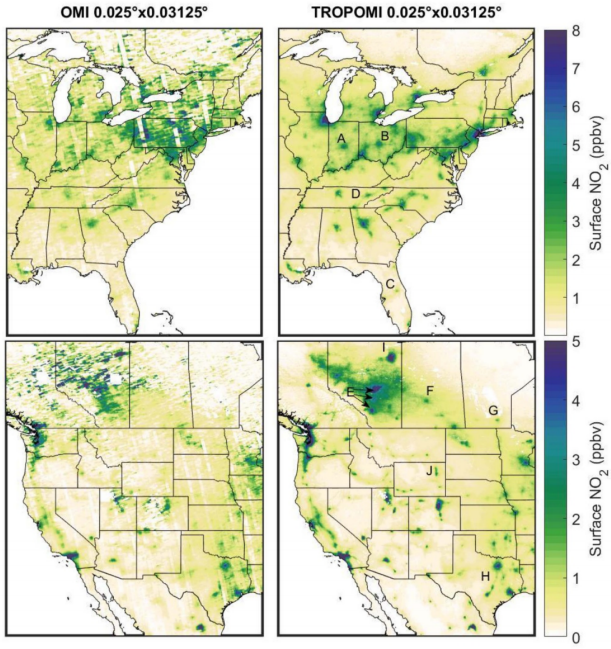


Figure 2. Annual mean surface NO_2 concentrations inferred from OMI and TROPOMI vertical column densities from July 2018 to June 2019 at 0.025° × 0.025° resolution. Features mentioned in text are labeled as (A) Indianapolis, (B) Columbus, (C) Orlando, (D) Interstates-75 and -81, (E) Edmonton-Red Deer-Calgary, (F) Saskatoon, (G) Winnipeg, (H) Interstate-35, (I) Canadian oil sands region, (J) eastern Wyoming oil fields.

Figura 1.28: Comparación de concentraciones medias anuales de NO_2 superficial inferidas por OMI (izquierda) y TROPOMI (derecha) sobre el este de EE. UU. TROPOMI revela estructuras finas y corredores de transporte (puntos A-D) invisibles para sensores de menor resolución. Adaptado de [Cooper et al., 2020].

Mediciones MAX-DOAS de perfiles verticales de NO2 y HCHO en la troposfera en la estación de fondo regional de Longfengshan en el noreste de China - Shuyin Liu, Siyang Cheng, Jianzhong Ma, Xiaobin Xu, Jinguang Lv, Junli Jin, Junrang Guo, Dajiang Yu and Xin Dai

Monitoreo Remoto Terrestre (MAX-DOAS) Complementando las observaciones satelitales, las técnicas de espectroscopía de absorción óptica diferencial multieje (MAX-DOAS) permiten recuperar perfiles verticales de gases traza desde tierra con alta resolución temporal. Un estudio reciente realizado por Liu et al. (2023) en la estación de fondo regional de Longfengshan (noreste de China) utilizó este método para caracterizar la distribución vertical de NO_2 y formaldehído (HCHO) durante un año completo (2020-2021). A diferencia de los entornos urbanos dominados por emisiones locales, este sitio de fondo permitió analizar la química atmosférica en condiciones de contaminación regional transportada [Liu et al., 2023].

Perfiles Verticales y Variabilidad Estacional Los resultados mostraron que, incluso en un sitio de fondo, el NO_2 presenta una estratificación vertical clara, con las mayores concentraciones confinadas en la capa cercana a la superficie (0-1 km) y decreciendo con la altura. Los valores medios de la columna vertical ($4{,}69 \times 10^{15}$ $\mathrm{moléculas/cm^2}$) y la concentración en superficie ($1{,}22$ ppb) mostraron un ciclo estacional marcado, con máximos en invierno debido a la calefacción regional y una vida útil más larga del NO_2, y mínimos en verano. Este patrón es consistente con lo observado por satélites como TROPOMI, validando la capacidad de los sensores remotos para capturar la dinámica estacional incluso en áreas con niveles de contaminación moderados [Liu et al., 2023].

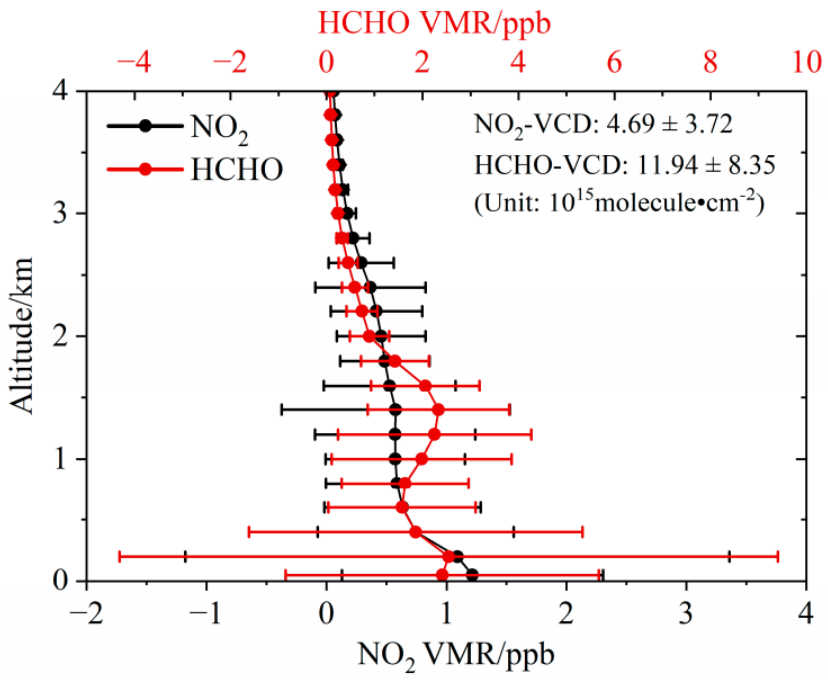


Figura 1.29: Perfiles verticales promedio de NO_2 (negro) y HCHO (rojo) recuperados mediante MAX-DOAS en la estación de Longfengshan. Se observa la acumulación superficial de NO_2 frente a una capa elevada de HCHO. Adaptado de [Liu et al., 2023].

Química del Ozono y Sensibilidad El estudio también analizó la relación HCHO/NO_2 para determinar el régimen de producción de ozono (O_3). Se encontró que, en esta región de fondo, la formación de ozono está limitada principalmente por la disponibilidad de NO_X (régimen limitado por NO_X), especialmente cuando la temperatura y la humedad son altas. Además, se observó una capa elevada de HCHO alrededor de los 1.4 km de altura, lo que sugiere procesos de transporte o producción secundaria que los satélites que miden columnas totales podrían interpretar erróneamente si no se consideran estos perfiles verticales [Liu et al., 2023].

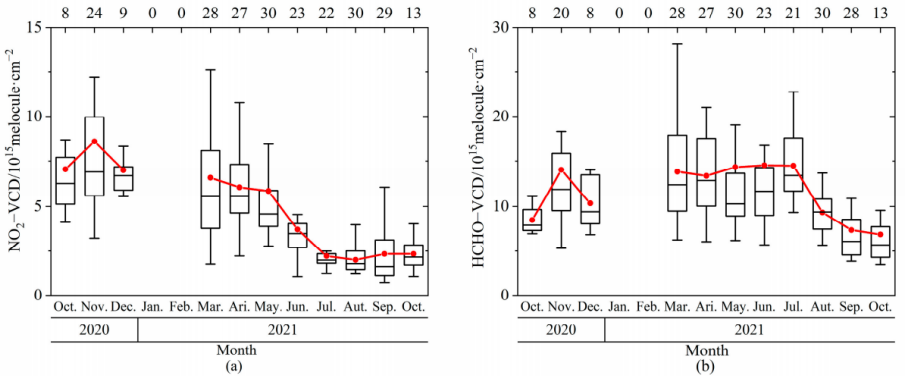


Figura 1.30: Variación mensual de las columnas verticales troposféricas (VCD) de NO_2 (a) y HCHO (b). Nótese el ciclo estacional opuesto entre ambos gases, con el NO_2 dominando en meses fríos. Adaptado de [Liu et al., 2023].

Contaminación del aire en Ucrania: una vista desde el satélite Sentinel-5P - Mykhailo Savenets

Vigilancia de Territorios No Controlados Savenets (2021) presentó un análisis exhaustivo de la contaminación del aire en Ucrania utilizando datos de Sentinel-5P para el periodo 2018-2020. La relevancia de este estudio radica en su capacidad para evaluar la calidad del aire en regiones donde la red de monitoreo terrestre es inexistente o ha dejado de operar debido a conflictos geopolíticos, como la región de Donbass. Mediante el sensor TROPOMI, fue posible identificar y cuantificar focos de emisión industrial crítica —especialmente centrales térmicas de carbón— en territorios fuera del control gubernamental [Savenets, 2021].

Metodología de Conversión a Superficie Para evaluar el impacto real en la salud y comparar los datos satelitales con los estándares nacionales de calidad del aire, el estudio propuso una metodología para convertir la densidad de columna total a concentraciones cercanas al suelo. Asumiendo que la mayor parte de la carga contaminante (NO_2, SO_2, CO) se concentra en la troposfera inferior, se aplicó la Ecuación 1.5 para estimar la concentración en superficie (C):

$$C = \frac{C_{col} \cdot M \cdot A}{H} \tag{1.5}$$

donde:

- C: Concentración del contaminante en superficie [mg/m^3].
- C_{col}: Densidad de columna vertical del contaminante [mol/m^2].
- M: Masa molar del contaminante [g/mol].
- A: Factor de conversión de unidades ($A = 1000\,[mg/g]$).
- H: Altura de la capa de mezcla efectiva [m] (asumida en 10000[m] para este análisis regional).

Esta formulación fue fundamental para demostrar que, durante la temporada de calefacción, las concentraciones estimadas en superficie excedían los umbrales nacionales de seguridad en las zonas industriales no controladas, validando la utilidad del satélite como herramienta de auditoría ambiental independiente [Savenets, 2021].

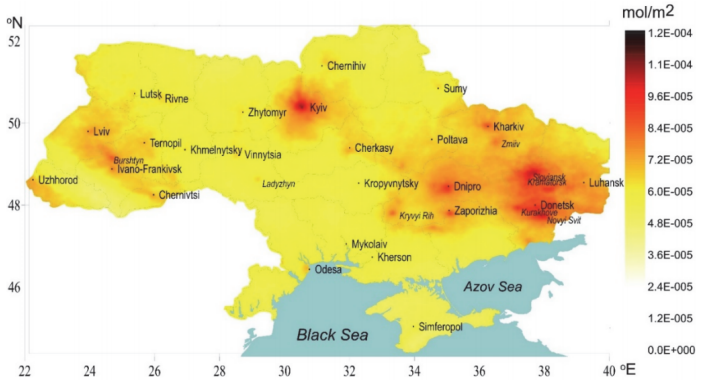


Figura 1.31: Distribución espacial de la densidad de columna de NO_2 sobre Ucrania. El satélite revela puntos calientes industriales en el este (Donbass) y contaminación urbana en Kiev, supliendo la falta de estaciones terrestres. Adaptado de [Savenets, 2021].

Variabilidad Estacional y Efectos Meteorológicos El estudio también profundizó en la estacionalidad, observando patrones distintos entre zonas urbanas y rurales. Un hallazgo clave fue la comparación entre enero de 2019 y enero de 2020: condiciones meteorológicas anómalas (un invierno inusualmente cálido en 2020) redujeron drásticamente las concentraciones detectadas por el satélite. Esto subraya la necesidad de integrar variables meteorológicas al aplicar la Ecuación 1.5, ya que la dispersión atmosférica puede alterar la relación entre la columna vertical y la concentración en superficie [Savenets, 2021].

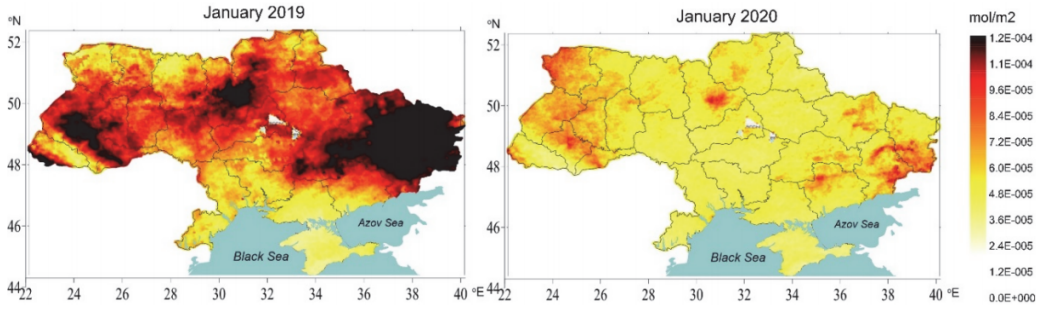


Figura 1.32: Comparación de la columna de NO_2 entre enero de 2019 (típico) y enero de 2020 (anómalamente cálido). La meteorología influyó tanto en la demanda de calefacción como en la dispersión. Adaptado de [Savenets, 2021].

Capítulo 2

Metodología de trabajo y desarrollo de software

2.1. Introducción al diseño experimental

El presente capítulo detalla la metodología técnica y el desarrollo de software implementado para la construcción de la base de datos de la investigación. El objetivo central fue crear un ecosistema automatizado capaz de adquirir, procesar y validar datos de concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) provenientes de dos fuentes primarias: observaciones satelitales (Sentinel-5P) y estaciones de monitoreo terrestre (SINCA), junto a la base de datos de reanálisis meteorológicos (ERA5) para la descarga de un factor adicional utilizado para el procesamiento.

Para asegurar la reproducibilidad y escalabilidad del estudio, el desarrollo se estructuró siguiendo un orden lógico de ingeniería de software:

1. Evaluación del estado del arte tecnológico: Selección de APIs y librerías.
2. Desarrollo del algoritmo satelital: Implementación del núcleo de procesamiento para TROPOMI.
3. Ingeniería de datos terrestres: Automatización del sistema SINCA.
4. Integración meteorológica: Incorporación de la variable de BLP.
5. Orquestación mediante interfaz gráfica: Diseño de una herramienta de usuario final para la ejecución del proceso.

A continuación, se profundiza en cada etapa técnica.

2.1.1. Contexto de códigos existentes y selección de herramientas

La gestión de datos satelitales masivos presenta desafíos significativos en términos de volumen y accesibilidad. Aunque el acceso manual a través del Copernicus Browser es posible para consultas puntuales, resulta inviable para un estudio longitudinal (2018-2024) que requiere descargas mensuales sistemáticas y recortes geográficos precisos.

Se evaluaron tres librerías del ecosistema Python para la gestión de descargas mediante Interfaces de Programación de Interfaces (API, por sus siglas en inglés):

- OpenEO: Esta librería permite la obtención de datos de concentración de NO_2 como productos de Nivel 2, sin embargo, fue descartada debido a que trabaja con la columna atmosférica completa sin discriminar por capas. Para

los fines de esta investigación, es crítico aislar la tropósfera de la estratósfera, funcionalidad que esta herramienta no facilitaba de manera directa.



Figura 2.1: Logo de OpenEO

- Google Earth Engine (GEE): Si bien GEE permite la separación de capas atmosféricas, la plataforma proporciona datos de Nivel 3 (L3). Los productos de Nivel 3 ya han sido reprocesados y grillados espacialmente. Utilizar estos datos limitaría el análisis posterior, ya que al trabajar con información previamente interpolada, se pierde la ”crudeza” necesaria para aplicar algoritmos de transformación personalizados sin introducir sesgos adicionales.



Figura 2.2: Logo de Google Earth Engine

- Sentinel Hub: Esta fue la opción seleccionada. La librería permite la discriminación y segregación por capas atmosféricas y ofrece acceso a datos de Nivel 2 (L2). El Nivel 2 representa un equilibrio óptimo: son datos geofísicos calibrados y válidos, pero lo suficientemente crudos para permitir su manipulación y procesamiento matemático en fases posteriores del estudio.



Figura 2.3: Logo de SentinelHub

2.1.2. Elaboración y descripción del código satelital

El núcleo del procesamiento satelital reside en el script Descargador_TROPOMI. Este algoritmo fue diseñado para orquestar la descarga, corrección y visualización de los datos de Sentinel-5P.

Flujo lógico del algoritmo

El funcionamiento del software sigue una secuencia lineal de procesamiento que asegura la integridad de los datos. A continuación, se presenta el diagrama de flujo que modela la lógica interna del código desarrollado:

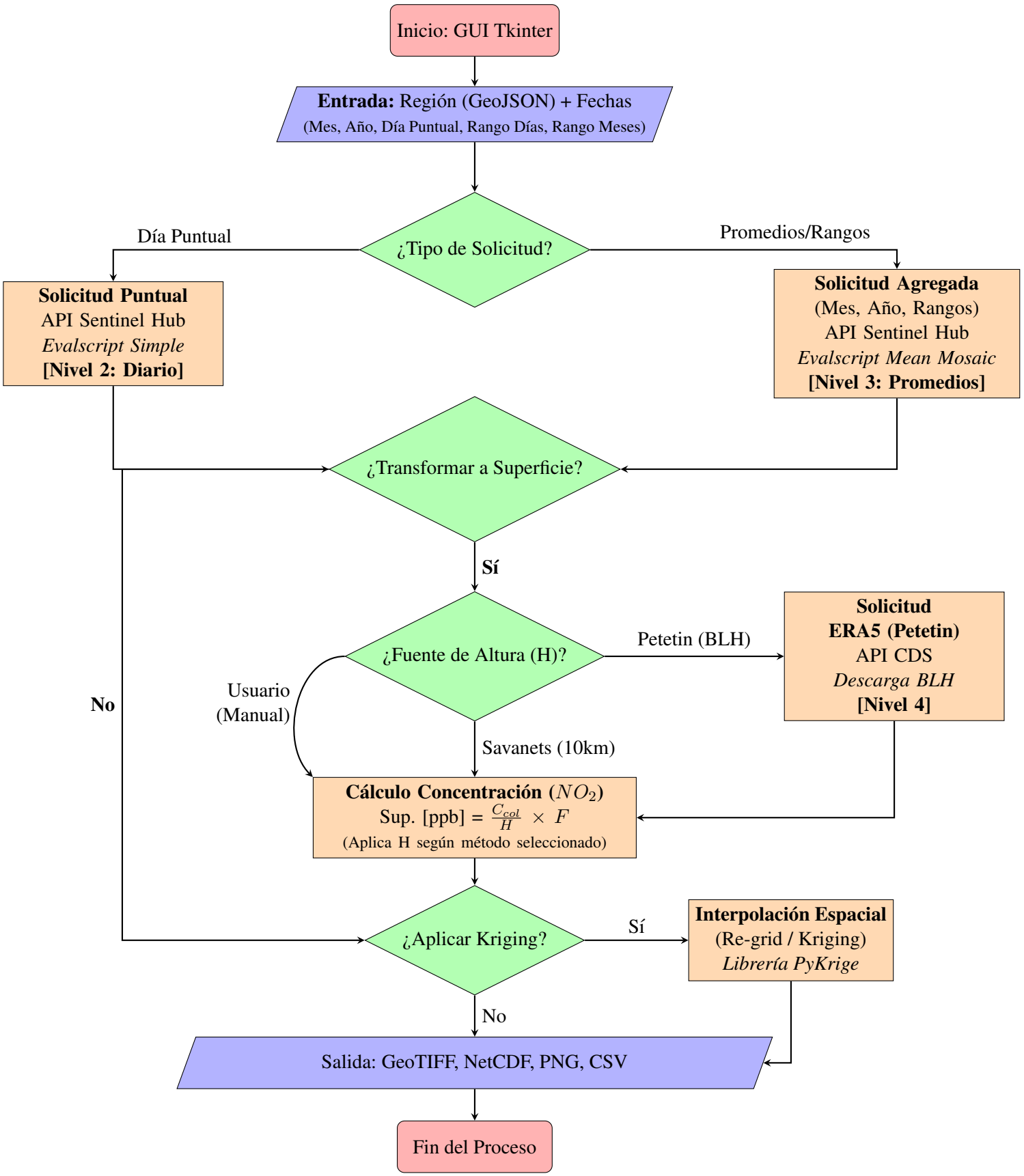


Figura 2.4: Diagrama de flujo detallado con lógica de transformación y opciones de altura (H).

2.2. Lógica de Selección de Algoritmos y Funciones Adicionales

Para abordar la variabilidad temporal de los análisis de NO_2, el sistema implementa una lógica de selección dinámica dentro de la función orquestadora `run_processing`. Esta distinción es fundamental para garantizar la integridad estadística de los datos según el periodo solicitado por el usuario.

2.2.1. Diferenciación de Mosaicos: Día Puntual vs. Rango Temporal

El sistema selecciona automáticamente entre dos scripts de evaluación (evalscripts) de Sentinel Hub dependiendo del modo de operación:

- Análisis de Día Puntual (Modo **`dia`**): Se utiliza un evalscript con configuración `mosaicking: "SIMPLE"`. Al solicitar una fecha específica, el sistema recupera la captura satelital directa sin realizar promedios temporales, preservando los valores brutos de la columna de NO_2 para ese instante.
- Análisis de Rangos (Modos **`mes`**, **`anio`**, **`rango`**): Se implementa un evalscript con configuración `mosaicking: "ORBIT"`. Dado que las mediciones de satélite pueden verse afectadas por nubosidad o pasadas parciales en un periodo largo, este script ejecuta una función de reducción en el servidor de Sentinel Hub. El algoritmo filtra los píxeles con `dataMask == 1` (datos válidos) y calcula el promedio aritmético de todas las observaciones disponibles en el rango de fechas, generando una imagen compuesta representativa del periodo.

Componentes técnicos del sistema

La Tabla 2.1 presenta la totalidad de las funciones modulares desarrolladas, abarcando desde la descarga de datos satelitales (TROPOMI) y meteorológicos (ERA5) hasta el procesamiento matemático y la visualización final.

Función (Python)	**Descripción Técnica**
Fase 1: Pre-análisis y Descarga de Datos	
`calcular_estadisticas_nubosidad`	Realiza una petición ligera de la banda `CLOUD_FRACTION` antes de la descarga principal. Calcula el porcentaje promedio de cobertura nubosa para validar la viabilidad del análisis.
`datos_mes_no2`	Construye el objeto `SentinelHubRequest` para descargar la densidad de columna vertical (VCD) de NO_2 desde el satélite Sentinel-5P (TROPOMI), aplicando el *evalscript* correspondiente (Simple u Orbit).
`descargar_blh_era5`	Conecta con el CDS para descargar el **promedio mensual** de la altura de capa límite (BLH). Usado en análisis mensuales/anuales para obtener una meteorología representativa.
`descargar_blh_era5_diario`	Solicita al CDS la altura de capa límite (BLH) con **resolución horaria** (13:00 h) para análisis de días puntuales, asegurando coincidencia temporal con el paso del satélite.
Fase 2: Procesamiento e Interpolación	
`convertir_nc_a_tiff`	Transforma los archivos meteorológicos crudos (NetCDF de ERA5) a formato GeoTIFF y les asigna el sistema de coordenadas EPSG:4326 para permitir el álgebra de mapas.
`regrid_geotiff`	Implementa el algoritmo de *Ordinary Kriging* para interpolar valores en una malla regular, rellenando píxeles faltantes y suavizando el ruido de la medición satelital.
`procesar_concentracion_no2`	Función crítica que alinea las matrices de NO_2 (Sentinel) y BLH (ERA5) —de distintas resoluciones— y aplica la fórmula de conversión matemática celda por celda para estimar la concentración en superficie.
Fase 3: Análisis y Visualización	
`analyze_tiff_statistics`	Calcula métricas estadísticas descriptivas (media, mediana, desviación estándar) de los rásteres y genera histogramas de distribución.
`generar_mapa_con_leyenda`	Utiliza `matplotlib` y `contextily` para generar mapas individuales PNG listos para publicación, superponiendo los datos sobre un mapa base geográfico.
`generar_mapa_comparativo`	Genera una figura compuesta (*subplots*) que integra múltiples rásteres temporales con una escala de color unificada, permitiendo la comparación directa entre meses o años.
`run_processing`	Orquestador principal que gestiona el flujo lógico completo, selecciona los algoritmos adecuados y maneja la concurrencia y errores del sistema.

Cuadro 2.1: Descripción detallada de todas las funciones del algoritmo de procesamiento satelital.

2.2.2. Ingeniería de datos terrestres (SINCA)

La validación cruzada requiere datos de superficie confiables. Sin embargo, la infraestructura digital del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) presentó barreras técnicas que impedían una descarga masiva eficiente.

"El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio de Medio Ambiente pone a su disposición información de calidad de aire de todo el país, buscando mejorar gradualmente el conocimiento, la vigilancia y la gestión de la calidad del aire que respiramos." [Ministerio del Medio Ambiente, 2025]

Gracias a este servicio, es posible obtener registros de concentración superficial de NO_2 en puntos estratégicos de cada región del país.

El flujo de trabajo manual tradicional para la adquisición de datos desde la plataforma SINCA se caracteriza por ser un proceso secuencial que inicia con el acceso al portal web y la navegación hacia la sección de información histórica. Posteriormente, se requiere la selección manual de la región administrativa y la identificación de la estación de monitoreo específica dentro del listado disponible, verificando la disponibilidad del contaminante de interés, específicamente dióxido de nitrógeno (NO_2). Una vez localizada la fuente, es necesario configurar los parámetros temporales —tales como la frecuencia de muestreo y el rango de fechas— para finalmente seleccionar el formato de salida (PDF, TXT o CSV). No obstante, este procedimiento presenta una limitación crítica operativa: los archivos resultantes carecen de metadatos espaciales y de identificación de la estación, conteniendo únicamente series temporales de valores, lo que obliga al investigador a ejecutar procesos secundarios de búsqueda para georreferenciar cada punto de datos y dotarlos de contexto espacial.

FECHA(YYMMDD)	**HORA**(HHMM)	**Registros validados**	**Registros preliminares**	**Registros no validados**
141220	00:00	–	–	2,85216
141221	00:00	–	–	2,83014
141222	00:00	–	–	–
⋮	⋱	⋮	⋰	⋮
170930	00:00	–	–	3,69

Cuadro 2.2: Muestra de registros con el inicio y fin de la serie: Estación Quillón, Ñuble, 20/12/2014 - 30/09/2017 [Ministerio del Medio Ambiente, 2025].

La solución automatizada (**`sinca.py`**): Para resolver esto, se desarrolló el script `sinca.py`, cuyas funciones se detallan en la Tabla 2.3. Este código elimina la interacción manual y resuelve el problema de geolocalización.

Función (Python)	**Descripción Técnica**
`load_master_station_file`	Carga una base de datos relacional interna (construida manualmente) que asocia los IDs de las estaciones con sus coordenadas UTM/Lat-Lon reales.
`fetch_sinca_data`	Construye dinámicamente la URL de petición HTTP directa al servidor del SINCA (`/cgi-bin/APUB-MMA/`), inyectando los códigos de región y estación para "saltarse"la interfaz web.
`parse_sinca_csv_series`	Recibe el flujo de bytes crudos (CSV sucio) que entrega el servidor, limpia encabezados corruptos y formatea las fechas para su análisis con Pandas.
`main (lógica de iteración)`	Itera sobre una lista de regiones y años (2018-2024), descarga todos los datos disponibles, los cruza con las coordenadas maestras y genera automáticamente archivos GeoTIFF y mapas PNG de las estaciones.

Cuadro 2.3: Descripción de funciones del script de descarga SINCA.

Concentración superficial de NO_2

Respecto a la obtención de registros in situ a partir de las bases de datos disponibles en la plataforma del SINCA, se efectuó un análisis general focalizado en las regiones con mayor densidad de estaciones de monitoreo.

Inicialmente, se consideraron todas las estaciones disponibles, definiendo como criterio de inclusión aquellas que contaran con actualización de datos de dióxido de nitrógeno y cuya disponibilidad de datos fuese superior al 90 % para el período analizado. A partir de ello, se generaron mapas de registros puntuales, tal como se aprecia en 2.5.

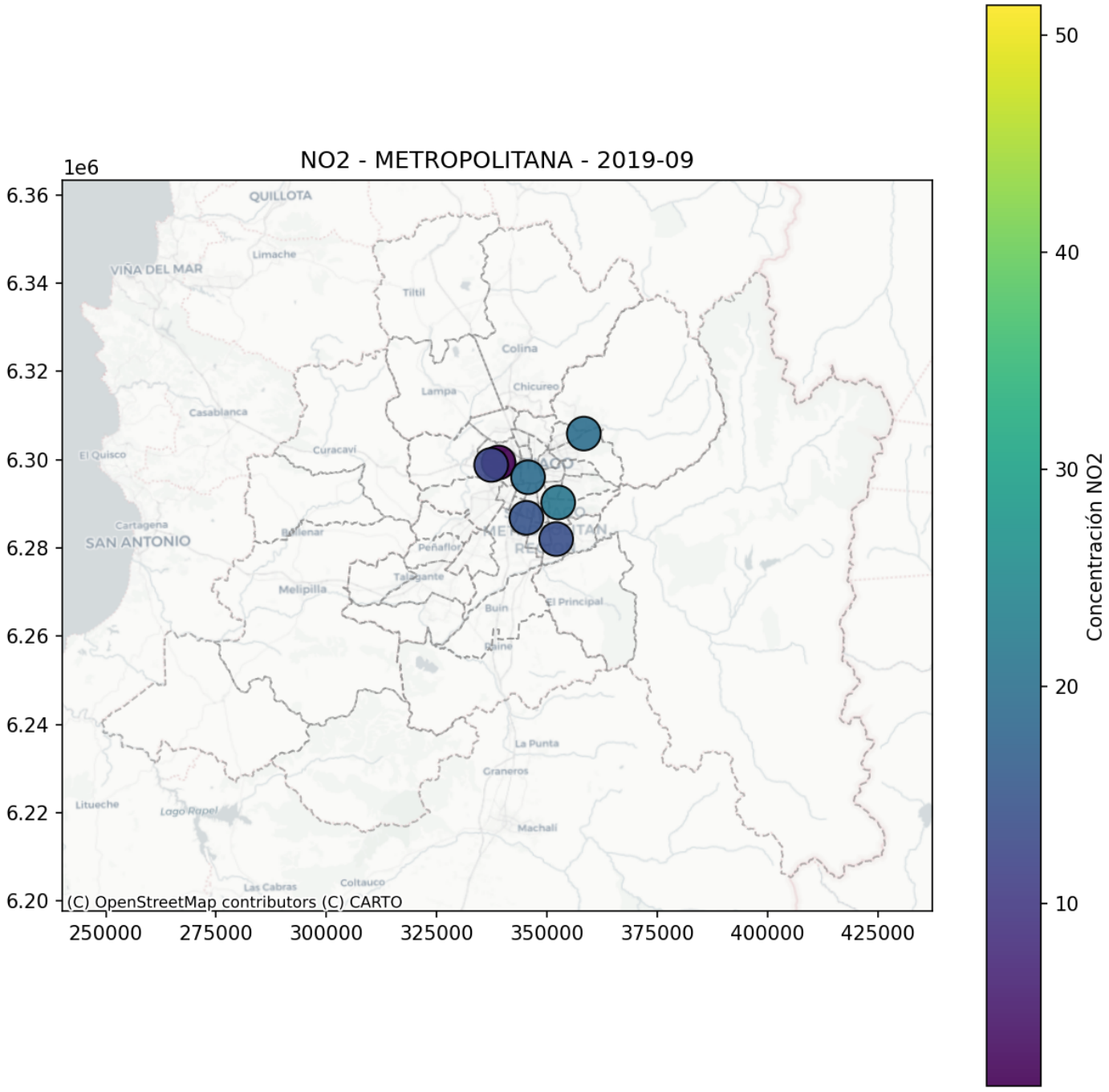


Figura 2.5: Mapa de registros puntuales de concentración de dióxido de nitrógeno en la Región Metropolitana para septiembre de 2019.

En dicha figura es posible apreciar la escala de concentraciones dispuesta en los puntos estratégicos de la capital. Se visualiza el gran número de estaciones presentes en la región, sin embargo, esta cantidad fue restringida debido a la necesidad de mayor rigurosidad en el análisis regional. En consecuencia, se seleccionaron las tres zonas previamente mencionadas, resultando en la cartografía correspondiente a la figura 2.10.

De forma que al exponer y presentar la información detectada por las extaciones de monitoreo para el periodo completo, resulta la siguiente serie temporal representada en un gráfico de barras agrupando las medias mensuales de concen-

tración de NO_2 [Ministerio del Medio Ambiente, 2025].

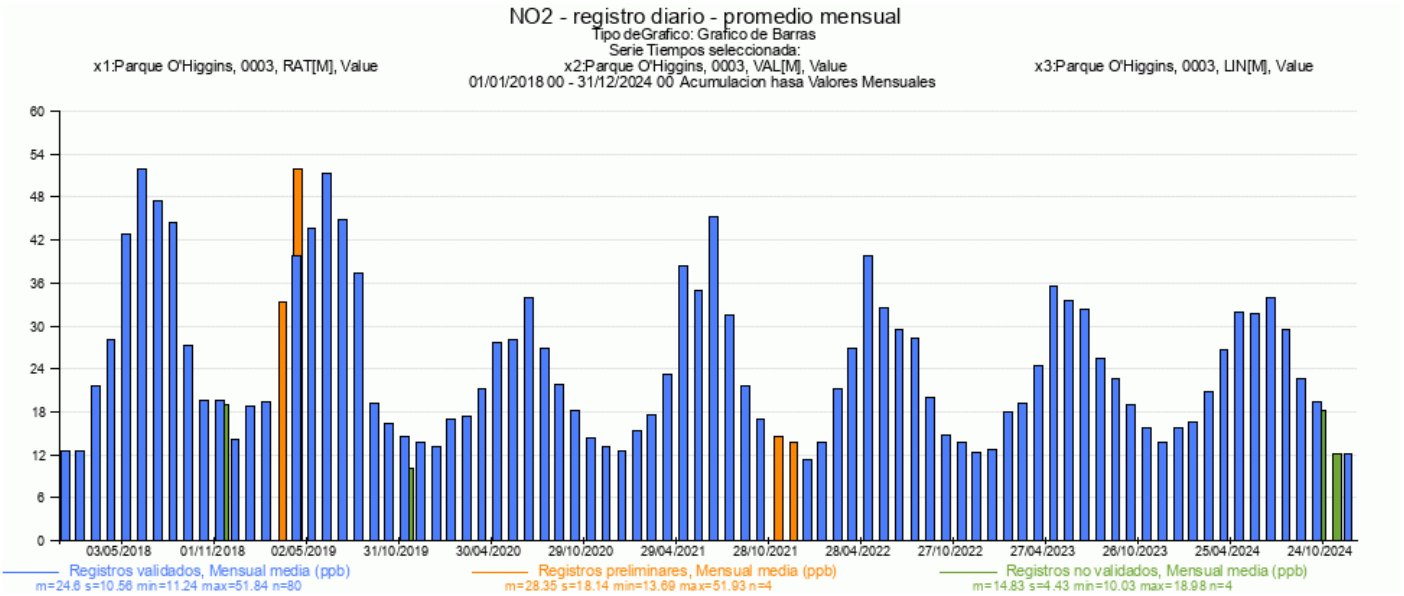


Figura 2.6: Gráfico de barras de medias mensuales del periodo 2018-2024, Región Metropolitana, Parque O'Higgins.

2.2.3. Integración meteorológica: Reanálisis ERA5

Para transformar correctamente la columna troposférica a una concentración superficial equivalente, hay que considerar la dinámica atmosférica. La ecuación (1.5) de Savenets original utiliza una altura de mezcla genérica, lo cual introduce errores significativos.

Liu describió la distribución vertical del dióxido de nitrógeno (NO_2), señalando que su presencia se concentra predominantemente en altitudes bajas y se vuelve prácticamente imperceptible por encima de los 4000[m] [Liu et al., 2023]. A partir de esta observación, se buscó determinar una altitud media que permitiera optimizar la transformación de los datos mediante la ecuación propuesta por Savanets, una metodología seleccionada por su notable simplicidad operativa.

Para este propósito, se consideró la Capa Límite Planetaria (PBL, por sus siglas en inglés), también denominada capa límite atmosférica, definida como la zona inferior de la atmósfera que se encuentra en contacto directo con la superficie terrestre. Al analizar el diagrama presentado en el trabajo de Liu, se evidencia que la mayor concentración del gas se acumula en la franja inferior a los 2000[m]. Dado que la PBL se sitúa dentro de este rango, su altitud es un parámetro de gran utilidad para la aplicación de la mencionada transformación.

Para la obtención de registros que entreguen la magnitud de este parámetro se recurrió a una base de datos de acceso público disponible, la cual permite la descarga de datos específicos para la altura de la capa límite, utilizando el parámetro Altura de la Capa Límite Planetaria (BLH) obtenida dinámicamente del reanálisis ERA5.

El reanálisis ERA5, desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), constituye el estándar actual en datos atmosféricos globales, proporcionando una descripción detallada de la evolución climática con una resolución espacial de 0.25° (aproximadamente 31 km) y una frecuencia temporal horaria. Esta alta resolución resulta crítica para caracterizar la altura de la capa límite planetaria (BLH), variable que define el volumen efectivo de atmósfera donde se dispersan los contaminantes emitidos desde la superficie, como el dióxido de nitrógeno.

A diferencia de modelos estáticos, el ERA5 integra sistemas avanzados de asimilación de datos (4D-Var) que permiten capturar las fluctuaciones dinámicas de la estabilidad atmosférica y los ciclos diurnos de la profundidad de mezcla, ofreciendo así una precisión indispensable para corregir las variaciones en la columna vertical observada por el satélite [Hersbach et al., 2020].

Por ende, la ecuación implementada en el código para la conversión de unidades es la siguiente:

$$C_{sup}[ppb] = \frac{C_{col} \cdot M \cdot A}{BLH_{ERA5} \cdot F} \tag{2.1}$$

Donde:

- C_{col}: Densidad de columna (mol/m^2) obtenida de Sentinel-5P.
- BLH_{ERA5}: Altura de la capa límite (m) descargada específicamente para esa coordenada y hora desde ERA5.
- M, A, F: Constantes de masa molar y factores de conversión volumétrica a condiciones estándar.

El uso de BLH_{ERA5} como denominador variable permite que la estimación de concentración superficial se ajuste a las condiciones reales de dispersión de contaminantes de cada día.

2.2.4. Interfaz de Usuario (GUI) y Visualización

Para facilitar la operación del sistema, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) robusta utilizando `Tkinter`. Esta se encuentra disponible para su descarga en Descargador_TROPOMI

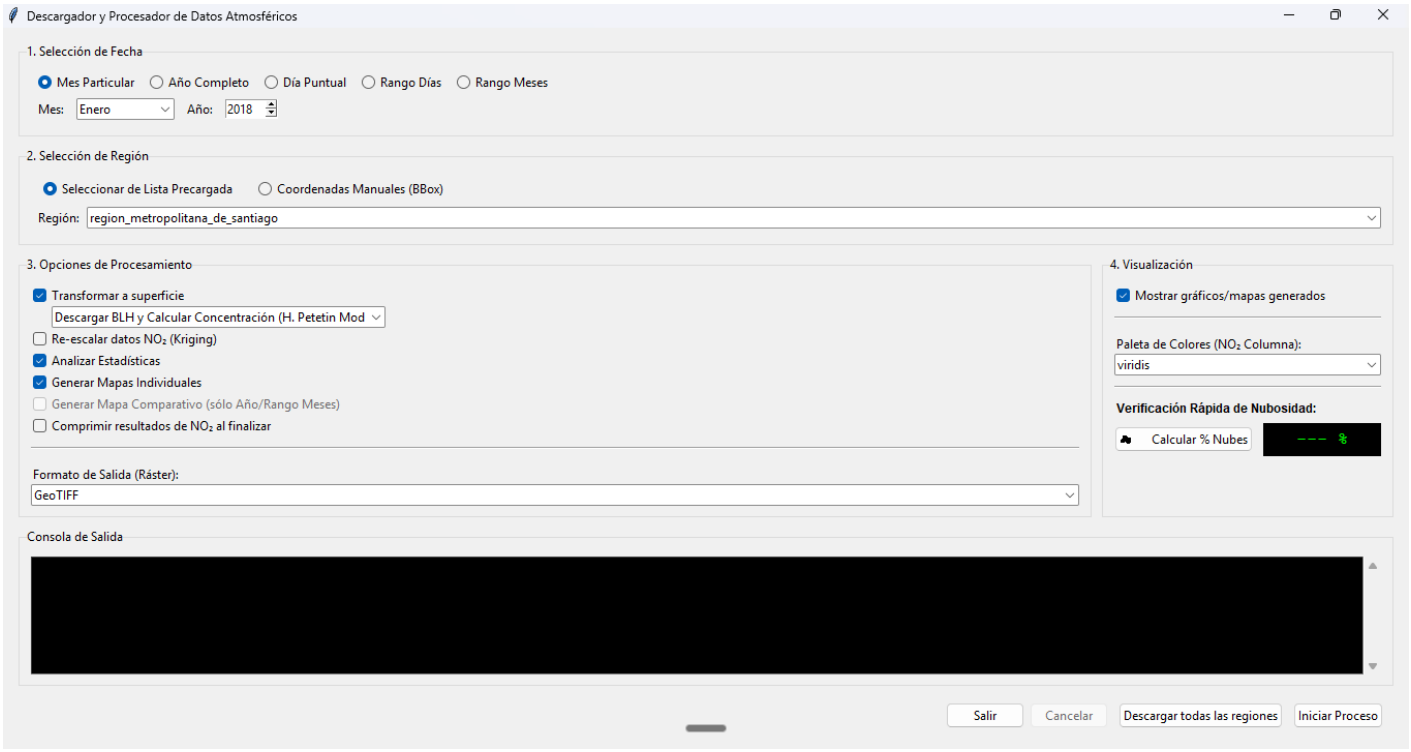


Figura 2.7: GUI Adicional desarrollada para la descarga

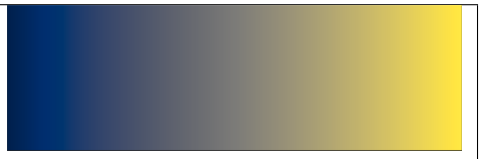
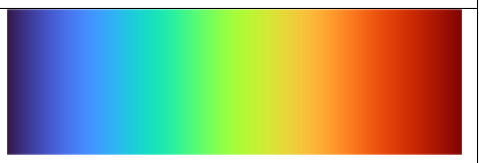
Esta interfaz permite al usuario controlar todo el flujo científico sin escribir código. Sus capacidades detalladas incluyen:

- Selector Temporal y Geográfico: Menús desplegables que cargan dinámicamente los archivos GeoJSON de las regiones, permitiendo seleccionar zonas de estudio y rangos de fechas (mensuales, anuales o puntuales) con un solo clic.

- Diagnóstico de Nubosidad: Un botón dedicado a pre-calcular el porcentaje de nubes en la zona de interés antes de iniciar la descarga pesada, permitiendo discriminar la validez de los datos según la obstrucción visual del satélite para la zona y lapso de interés.

- Configuración de Procesamiento: Checkboxes para activar o desactivar módulos específicos: descarga de BLH, aplicación de Kriging, generación de estadísticas o compresión de resultados en ZIP.

- Visualización Personalizada: El usuario puede seleccionar la paleta de colores científica más adecuada para representar los gradientes de contaminación. Las opciones integradas se muestran a continuación:

Cividis	
Viridis	
Turbo	
Inferno	
Batlow	

Cuadro 2.4: Paletas de colores de mapas de calor añadidas

Este entorno gráfico cierra la brecha entre la complejidad de los algoritmos de teledetección y la necesidad de obtener datos rápidos y fiables para el análisis ambiental.

Productos del procesamiento de datos

Una vez finalizadas las etapas de descarga y procesamiento de la información satelital, se procedió a la transformación de los datos de columna troposférica a concentración superficial. Como resultado de este flujo de trabajo, se generaron productos entregables específicos que facilitan la interpretación de los fenómenos estudiados:

- Imágenes vectoriales: Archivos que contienen la información geoespacial procesada y estructurada.
- Mapas de visualización: Imágenes en formato PNG diseñadas para una visualización óptima y accesible de la distribución espacial de los contaminantes.
- Estadísticas descriptivas: Archivos en formato CSV que consolidan los datos numéricos.
- Histogramas: Gráficos generados para revisar el comportamiento y la distribución de frecuencia de los datos en cada descarga.

2.3. Análisis y validación de resultados

2.3.1. Definición de las zonas de estudio

Para asegurar la viabilidad del análisis, se realizó un estudio de disponibilidad de datos en SINCA. Se identificaron y seleccionaron cuatro regiones representativas de las zonas norte, central y sur del país, las cuales cuentan con un volumen de datos suficiente para realizar la validación cruzada.

Zona Norte

Se seleccionó la Región de Antofagasta, la cual dispone de cuatro estaciones de monitoreo operativas: Estación Centro, Estación Juan José la Torre, Jardín Infantil Integra y Estación Super site.

Cabe destacar que se evaluó la incorporación de la Región de Atacama; sin embargo, esta fue descartada debido a la distribución geográfica de sus estaciones. Estas se encuentran concentradas en la comuna de Huasco, distantes de la capital regional y sin cubrir una superficie territorial suficiente para un análisis representativo.

Zona Central

Esta zona es crítica para el estudio debido a la alta densidad poblacional y la incidencia de enfermedades respiratorias. Se seleccionaron dos regiones:

- Región de Valparaíso: Importante por albergar el puerto principal del país. Cuenta con 15 estaciones de monitoreo dispersas en comunas estratégicas como Los Andes, Ventanas, Quintero, Valparaíso y Concón, asegurando que todas las comunas relevantes posean al menos un punto de medición.

- Región Metropolitana: Seleccionada por su relevancia como capital nacional. Posee ocho estaciones ubicadas en sectores estratégicos como Cerrillos, Cerro Navia, Independencia, Las Condes, Talagante y Parque O'Higgins.

Zona Sur

Se escogió la Región del Biobío como representante de la zona sur. Esta región incluye a Concepción, la segunda ciudad más poblada de Chile, y cuenta con 12 estaciones de monitoreo que permiten analizar correctamente el volumen de datos necesario.

Selección de estaciones

Con el propósito de alcanzar una mayor exactitud y precisión en el análisis de los datos descargados, se determinó pertinente la selección de estaciones específicas en cada una de las regiones. Esta estrategia permite ejecutar un estudio focalizado que abarque zonas estratégicas del territorio nacional, cubriendo las áreas geográficas preestablecidas sin incurrir en redundancias. Ello responde a la observación de múltiples estaciones situadas a distancias reducidas, las cuales resultan insuficientes para evidenciar variaciones significativas en la concentración de gases contaminantes entre ubicaciones adyacentes.

Antofagasta Debido a su ubicación geográfica y relevancia regional, se optó por estudiar exclusivamente las estaciones Super Site y Estación Centro. La primera se ubica en la ciudad de Tocopilla, la cual fue identificada como ”zona de sacrificio” nacional debido a la sobreexposición de emisiones por centrales termoeléctricas que cesaron operaciones muy recientemente. Mientras que la segunda se encuentra en Calama, ciudad de alta actividad minera, generando altas concentraciones de diversos gases contaminantes debido a sus procesos internos, incluyendo el transporte de materiales y personal.

Valparaíso Las estaciones designadas fueron Puchuncaví, Concón y Los Andes. La primera debido al contexto ambiental ampliamente conocido en algunos sectores del litoral central cercanos a Quintero y Ventanas. Otro por su cercanía al puerto principal y destino vacacional preferido por la población de la zona centro del país. Y por útlimo, una ciudad de gran relevancia por alto nivel industrial como su conectividad hacia uno de los pasos fronterizos más importantes a de la nación, el paso Los Libertadores.

Región Metropolitana Para la capital nacional, el análisis se centró en las estaciones ubicadas en Las Condes, Parque O’Higgins y Pudahuel. La primera debido a su alta densidad laboral, pues, es de los sectores que más trabajadores alberga, los cuales, al venir de diversos sectores de Santiago y alrededores, generan una alta concentración de emisiones debido al transporte vehicular. La segunda corresponde a un punto central dentro de la comuna de Santiago; su ubicación permite estudiar el comportamiento general de la capital, además cuenta con un monitoreo y chequeo de estado constante y riguroso para mantener su buen funcionamiento. Por último, Pudahuel alberga parte del sector poniente de Santiago, permitiendo estudiar zonas de origen de emisiones debido al transporte constante de personas a sectores con mayor capacidad laboral.

Bíobio Para la zona sur se determinó que las estaciones Consultorio - San Vicente y Kingston College representan correctamente la región estudiada. La primera se encuentra a las afueras de Talcahuano, ciudad industrial caracterizada por su tratamiento y producción de aceros, actividad emisora de gases contaminantes. Mientras que la segunda fue escogida debido a encontrarse en dentro de la capital regional, Concepción; permitiendo estudiar el comportamiento del NO_2 en la segunda ciudad más poblada del país.

En consecuencia, se seleccionaron las siguientes estaciones de monitoreo:

- Región de Antofagasta: Super Site y Estación Centro.

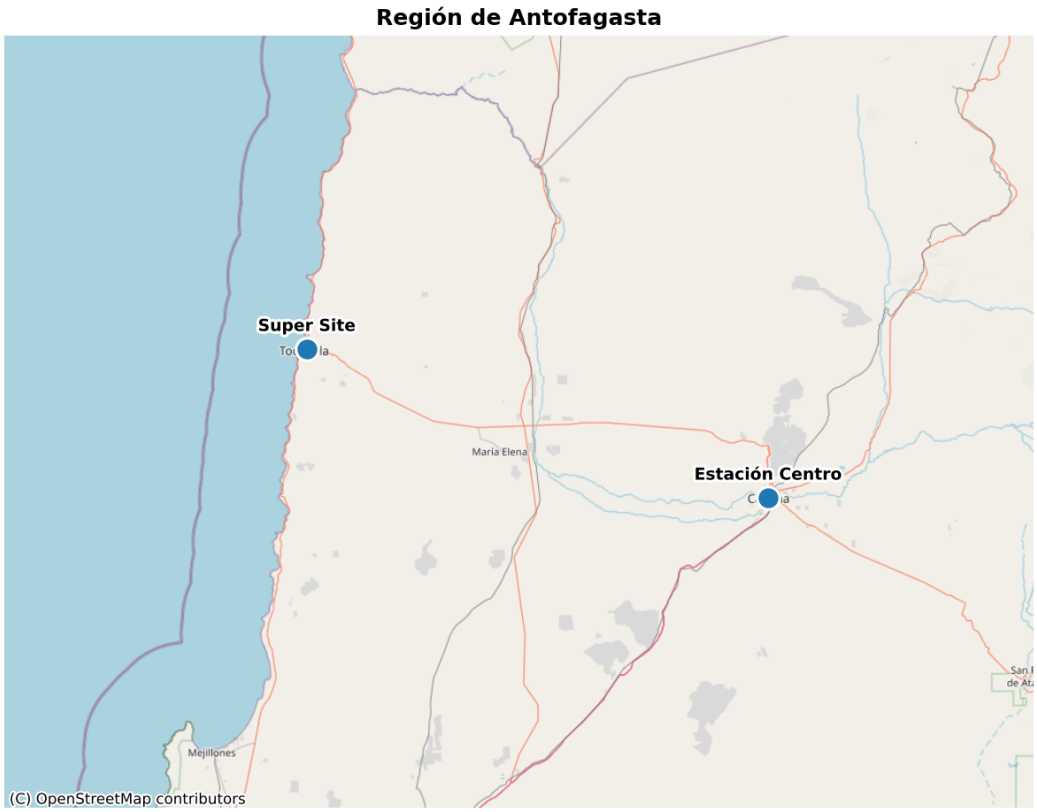


Figura 2.8: Estaciones seleccionadas: Región de Antofagasta

- Región de Valparaíso: Puchuncaví, Los Andes y Concón.



Figura 2.9: Estaciones seleccionadas: Región de Valparaíso

- Región Metropolitana: Las Condes, Parque O'Higgins y Pudahuel.

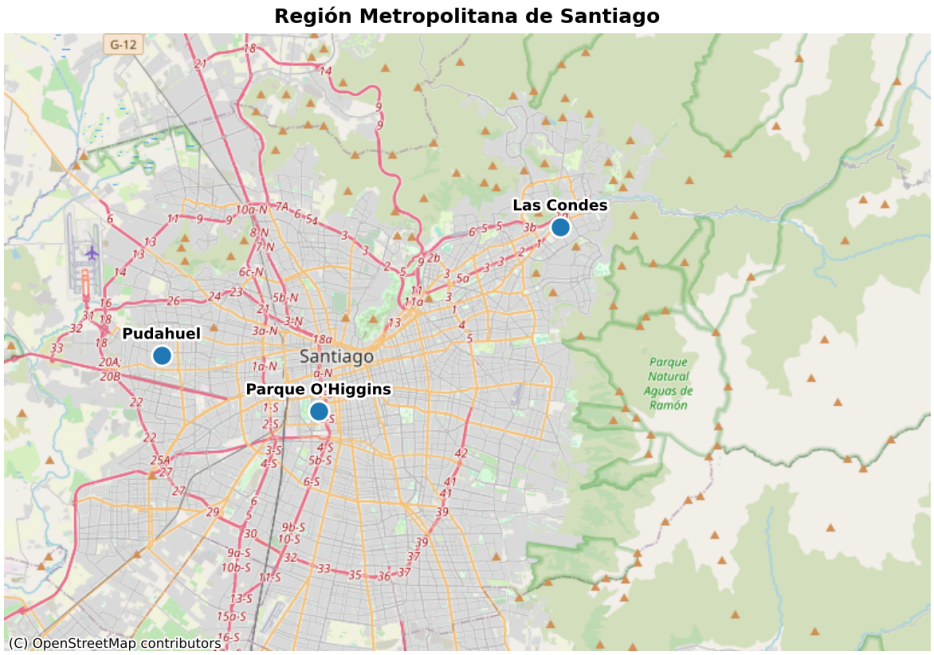


Figura 2.10: Estaciones seleccionadas: Región Metropolitana

- Región del Biobío: Consultorio San Vicente y Kingston College.



Figura 2.11: Estaciones seleccionadas: Región del Bíobio

Esta selección faculta el estudio de sectores estratégicos donde se registran concentraciones relevantes de dióxido de nitrógeno.

Preliminarmente, resulta necesario examinar la distribución de datos validados, preliminares y no validados en las estaciones escogidas, con el fin de ponderar la relevancia de cada una en el análisis propuesto. Dicha clasificación de la calidad de los datos se detalla en la Tabla 2.5.

Región	Estación	N° Datos	Desde	% Válidos	% Preliminares	% No válidos	% Vacíos	% Multiple
Antofagasta	Super Site	64	09 - 2019	0.00 %	0.00 %	92.19 %	7.81 %	0.00 %
Antofagasta	Estación Centro	84	01 - 2018	0.00 %	71.43 %	28.57 %	0.00 %	0.00 %
Valparaíso	Puchuncaví	84	01 - 2018	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
Valparaíso	Los Andes	64	09 - 2019	100.00 %	1.56 %	0.00 %	0.00 %	1.56 %
Valparaíso	Concón	84	01 - 2018	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
Metropolitana	Las Condes	84	01 - 2018	96.43 %	2.38 %	3.57 %	1.19 %	3.57 %
Metropolitana	Parque O'Higgins	84	01 - 2018	95.24 %	4.76 %	4.76 %	0.00 %	4.76 %
Metropolitana	Pudahuel	84	01 - 2018	97.62 %	2.38 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Biobío	Consultorio - San Vicente	84	01 - 2018	42.86 %	57.14 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Biobío	Kingston College	84	01 - 2018	0.00 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Cuadro 2.5: Estadísticas de validación de datos por estación [Ministerio del Medio Ambiente, 2025].

Esta expone la cantidad de datos correspondientes a los registros realizados durante el periodo solicitado, estos corresponden a: válidos, preliminares, no válidos, vacíos y duplicados. Esta categorización resulta fundamental para el análisis, ya que permite discriminar entre la información útil para la evaluación ambiental y aquella que presenta deficiencias técnicas.

De acuerdo con lo establecido en la Resolución Exenta N° 126 de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) [Superintendencia del Medio Ambiente, 2020], la distinción entre estos estados es normativa y no meramente descriptiva. Por ejemplo, los datos preliminares se entienden como aquellos registros que, si bien han pasado por un filtro automático para descartar los momentos de calibración del equipo, aún no han sido sometidos a la revisión exhaustiva final por parte del titular. Es decir, son datos que ofrecen una visión en tiempo real pero que carecen de la certeza definitiva.

Por otro lado, la categoría de datos validados representa el estándar de oro para el análisis de cumplimiento. Según Molina Matta y Cañas Ortega [Molina Matta and Cañas Ortega, 2020], la validez de un registro depende intrínsecamente de la correcta aplicación de los protocolos de operación y mantenimiento. Un dato validado es aquel que ha superado los controles de calidad y al cual se le han aplicado los códigos de invalidación del Decreto Supremo N° 61 (como cortes de energía o fallas de sensores), transformándose así en un promedio horario oficial y vinculante.

La Tabla 2.6 resume las implicancias de cada categoría en el contexto del monitoreo de NO_2, diferenciando su utilidad técnica y jurídica.

Cuadro 2.6: Clasificación operativa de los registros de calidad del aire.

Tipo de Dato	Definición y Alcance
Válidos	Promedios horarios depurados y verificados. Son los únicos admisibles para fiscalización y evaluación de cumplimiento normativo [Superintendencia del Medio Ambiente, 2020].
Preliminares	Registros automáticos que han descartado calibraciones básicas pero no han sido validados manualmente. Útiles para alertas tempranas.
No Válidos	Datos que presentan anomalías técnicas, fallas instrumentales o desviaciones fuera de rango que impiden su uso estadístico.
Vacíos/Nulos	Ausencia de registro por cortes de transmisión o energía. Representan lagunas en la serie temporal.
Duplicados	Errores de redundancia en la base de datos que deben ser consolidados para evitar sesgos en el conteo final.

Es importante destacar que, para este contraste, la cantidad de datos validados no se estableció como un criterio excluyente, dado que existen regiones que carecen de un volumen suficiente para realizar un análisis robusto bajo esa única restricción.

No obstante, las estaciones seleccionadas son aquellas que posibilitan establecer un análisis geográfico estratégico, permitiendo visualizar el comportamiento general del NO_2 en las regiones estudiadas.

2.3.2. Metodología de validación estadística

Para validar la fiabilidad de la transformación aplicada a los datos satelitales, se estableció una metodología rigurosa de intercomparación con las detecciones $\mathrm{in\ situ}$. La herramienta estadística principal seleccionada para este fin es el coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual permite cuantificar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables continuas. En el contexto de la teledetección, este índice es fundamental para determinar si las fluctuaciones observadas por el sensor Sentinel-5P corresponden sincrónicamente con las variaciones registradas por las estaciones de monitoreo terrestre.

El coeficiente de correlación de Pearson se define matemáticamente como el cociente entre la covarianza de las variables y el producto de sus desviaciones estándar. Para las series de datos del satélite (X) y las estaciones terrestres (Y), la fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{2.2}$$

Donde:

- n es el tamaño de la muestra (número de observaciones coincidentes).
- x_i, y_i son los valores individuales de las concentraciones satelitales y terrestres, respectivamente.

- $\bar{x}, \bar{y}$ son las medias aritméticas de cada serie de datos.

La elección del coeficiente de Pearson se justifica por su solidez en análisis bivariados. [Taylor, 2020] demuestra que las métricas de correlación multidireccional diseñadas para sistemas complejos ($d \geq 3$) convergen matemáticamente al módulo de Pearson en escenarios bidimensionales ($d = 2$). Dado que esta validación se centra exclusivamente en la relación lineal entre los datos satelitales de NO_2 y las mediciones terrestres, el uso de r resulta metodológicamente idóneo y suficiente, evitando la complejidad innecesaria de modelos multivariados.

La Tabla 2.7 ilustra esta convergencia teórica, evidenciando por qué el coeficiente de Pearson es preferible para distinguir la direccionalidad del fenómeno físico.

Cuadro 2.7: Comparación de convergencia entre Pearson (r) en dos dimensiones ($d = 2$).

Escenario de Correlación	**Pearson (r)**	**Implicancia para NO_2**
Correlación Positiva Perfecta	$+1$	Validación ideal (sincronía)
Ausencia de Relación	0	Independencia total
Correlación Negativa Perfecta	-1	Error sistemático inverso

Esto quiere decir que al encontrarnos dentro de una correlación negativa ($-1 < r < 0$), los valores tienden a diverger o alejarse, indicando una relación inversa no deseada entre el satélite y la estación. En cambio, si es que la correlación se encuentra en el rango 0 a 1, los valores tenderán a acercarse y a mostrar un comportamiento sincrónico, lo cual confirma que las variaciones en la columna vertical de gas capturadas por el sensor corresponden efectivamente a la dinámica de contaminación observada en superficie.

De manera complementaria, se incorpora el cálculo del Coeficiente de Determinación (R^2) para evaluar la bondad de ajuste del modelo. Mientras el coeficiente r indica la fuerza y dirección de la relación, el R^2 cuantifica la proporción de la varianza en los datos de las estaciones terrestres que es predecible a partir de los datos satelitales. Su formulación matemática se define como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{2.3}$$

Donde $\hat{y}_i$ representa los valores estimados por el modelo para la observación i. En el contexto de una regresión lineal simple, este valor equivale al cuadrado del coeficiente de Pearson (r^2), proporcionando una medida directa de la capacidad explicativa de la transformación aplicada.

Bajo este marco, se han definido los siguientes criterios de aceptación para el estudio:

1. Se aplicará el cálculo de r y R^2 para contrastar los registros realizados en las estaciones de monitoreo del SINCA con datos satelitales correspondientes a los píxeles ubicados en las mismas coordenadas.

2. Se establece un umbral de aceptación de $0{,}75$ para el coeficiente de correlación (r). Este criterio es exigente y busca asegurar que, para que los datos transformados se consideren aceptados para el análisis, se obtenga la máxima similitud en su comportamiento respecto a su contraparte terrestre. Un valor superior a este umbral indica una alta correlación positiva, validando la capacidad del modelo para reproducir la dinámica del contaminante.

Es pertinente señalar que, debido al alcance específico de esta investigación centrado en la validación de la columna vertical, no se integrará el análisis vectorial de la velocidad del viento como variable correlacional. Si bien la literatura

especializada, como la tesis doctoral de Morillas López [Morillas López, 2024], reconoce la advección y dispersión por viento como factores influyentes, su exclusión en esta etapa permite aislar la eficacia pura de la ecuación de transformación propuesta.

2.3.3. Herramientas de análisis cuantitativo

El estudio del comportamiento de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) se apoyará en dos técnicas complementarias de visualización y análisis descriptivo, esenciales para la caracterización de la distribución de los datos:

Diagramas de caja (Boxplots)

Se generarán diagramas de caja para cada estación de monitoreo del SINCA y para los datos satelitales homólogos. La relevancia de esta herramienta estadística radica en su capacidad para resumir robustamente la dispersión y la simetría de las distribuciones de datos sin asumir una distribución normal subyacente.

- Análisis de variabilidad: Permite comparar visualmente si el rango intercuartílico (IQR) de los datos satelitales transformados es consistente con la variabilidad natural capturada por los sensores en tierra, facilitando la detección de sesgos sistemáticos en la mediana de las concentraciones.
- Detección de anomalías y Hotspots: Se utiliza el criterio estadístico del diagrama de caja para establecer el umbral de los "hotspots.º eventos críticos. Matemáticamente, se definen como anomalías aquellos valores que exceden el límite superior calculado como $Q_3 + 1,5 \cdot IQR$ (donde Q_3 es el tercer cuartil y IQR el rango intercuartílico). Si bien estos valores extremos se excluyen de la visualización gráfica para preservar la escala de las distribuciones y facilitar la lectura, su identificación numérica es fundamental para aislar los episodios de alta contaminación del comportamiento base de la serie y distinguirlos de posibles artefactos en la medición satelital.

Series temporales

Se procederá a la graficación de series temporales correspondientes al percentil 90 $P90$ los registros mensuales para cada región seleccionada. Este análisis longitudinal es indispensable para validar la coherencia temporal de los datos:

- Estacionalidad y Ciclos: Permite estudiar el comportamiento estacional del contaminante, identificando patrones cíclicos de aumento (invierno) y disminución (verano) de la concentración, producto de la meteorología y la actividad antropogénica.
- Sincronía de Tendencias: El objetivo es confirmar si la magnitud y la tendencia (pendiente) descritas por la transformación satelital evolucionan en fase con las concentraciones registradas por las estaciones terrestres, asegurando que el satélite no solo capture la magnitud, sino también la dinámica temporal del fenómeno.

Este enfoque metodológico integral busca no solo una validación numérica mediante coeficientes, sino una comprensión fenomenológica que asegure que los datos satelitales son un proxy fiable de la realidad en superficie.

Capítulo 3

Resultados obtenidos, análisis y discusión

Una vez obtenidos los resultados descargados por el software desarrollado, se procede a presentarlos para su posterior análisis y discusión respecto a estos.

3.1. Descarga de datos SentinelHub

La configuración inicial para descargar los datos presentados fue la siguiente:

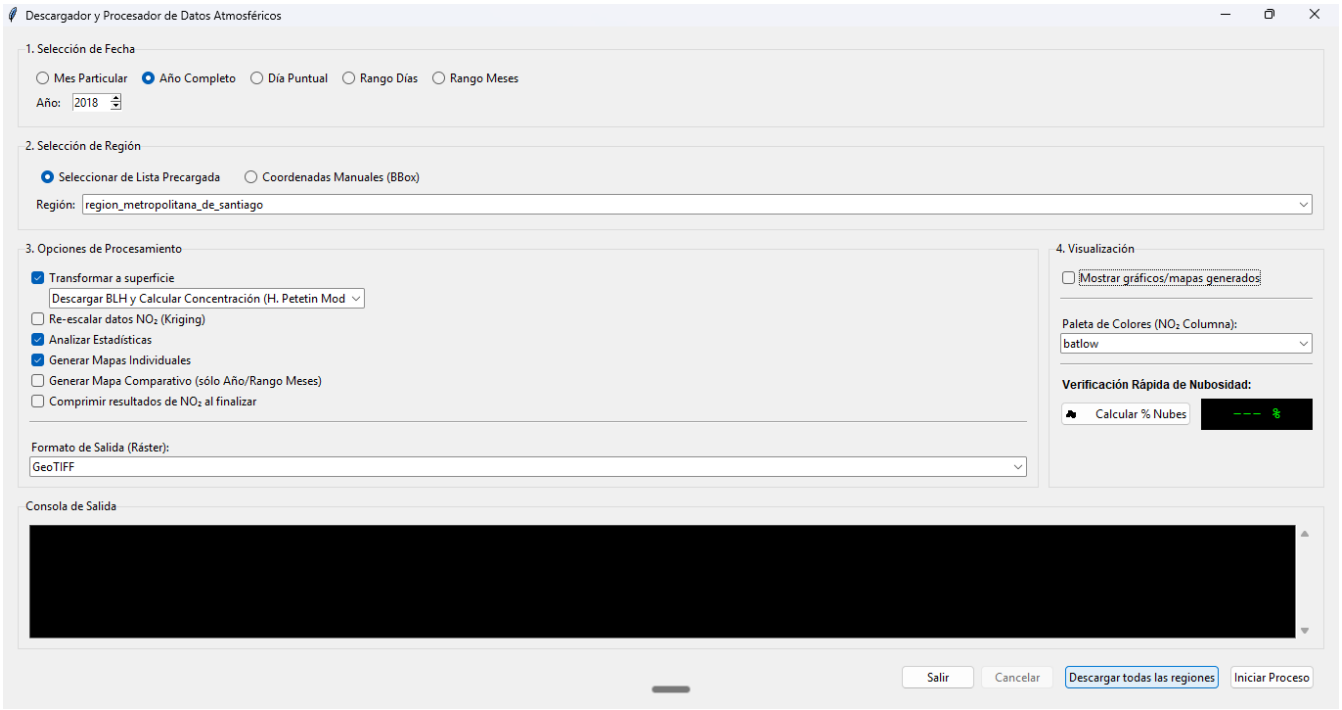


Figura 3.1: Interfaz de usuario configurada para obtener productos desde dos fuentes para el procesamiento de NO_2 troposférico en concentración superficial a partir del uso de **BLH** obtenida de los datasets de *ERA5*.

La selección corresponde a la descarga anual mediante los promedios mensuales de todas las regiones del país presentes en la base de datos del programa, entregando junto a la respuesta `GeoJSON` un mapa visualizable en formato `PNG` y la formación de histogramas descriptivos de la disposición de concentraciones por densidad de píxeles.

Con esta configuración se obtuvieron los siguientes resultados para cada región del país para cada año del periodo de análisis:

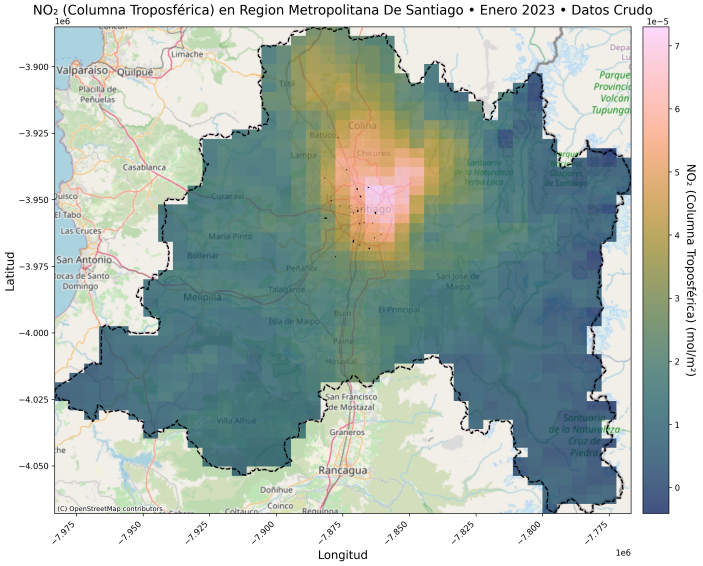


Figura 3.2: Mapa de concentración troposférica NO_2 generado desde *TROPOMI* por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

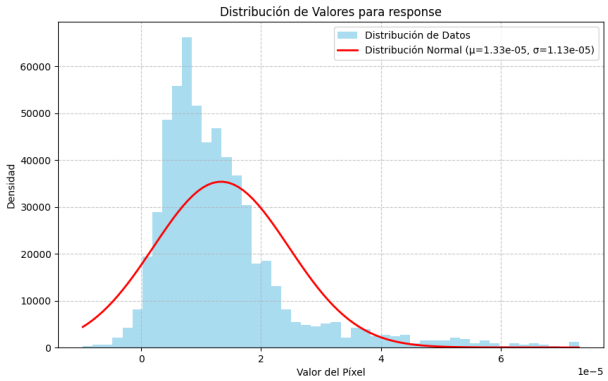


Figura 3.3: Histograma de densidad de datos de concentración NO_2 troposférico obtenida desde *TROPOMI* por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

Statistic	Value	Unit
Minimum	-9,718081e-06	$[mol/m^2]$
Maximum	7,299472e-05	$[mol/m^2]$
Mean	1,334e-05	$[mol/m^2]$
Std Dev	1,128e-05	$[mol/m^2]$
Data Points	2028	$[-]$

Cuadro 3.1: Resultados estadísticos de concentración NO_2 troposférico obtenida desde *TROPOMI* por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

Como fue mencionado, se hará uso de la descarga de BLH para el procesamiento de la columna troposférica en concentración superficial. El producto obtenido en formato GeoTIFF, para su visualización en softwares de tipo SIG, permite observar de manera clara el comportamiento de la BLP en la zona de interés demarcada para el periodo designado.

A su vez, para elaborar el procesamiento, se obtuvieron los siguientes productos:

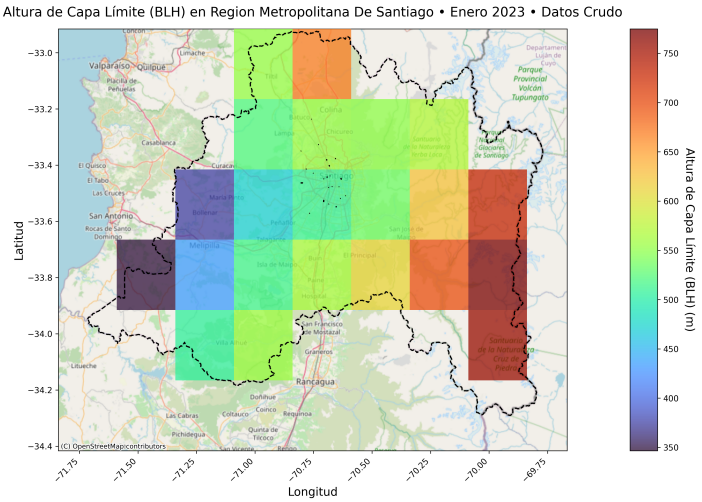


Figura 3.4: Mapa calor de altitud **BLH** generado desde *ERA5* por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

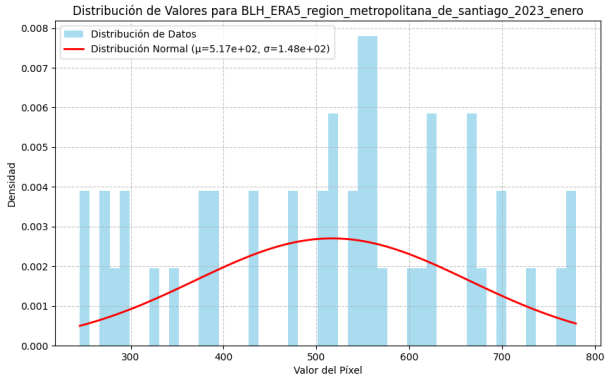


Figura 3.5: Histograma de densidad de datos de concentración **BLH** obtenida desde *ERA5* por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana

Statistic	Value	Unit
Minimum	245,15887	[m]
Maximum	779,4401	[m]
Mean	5,168e+02	[m]
Std Dev	1,477e+02	[m]
Data Points	48	[–]

Cuadro 3.2: Resultados estadísticos de concentración altitud de **BLH** obtenida desde *ERA5* por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

Una vez obtenidos ambos productos, se procede al uso de la ecuación (1.5) para su conversión de unidades de $\left[\mathrm{mol/m^2}\right]$ a [ppb], resultando los siguientes elementos:

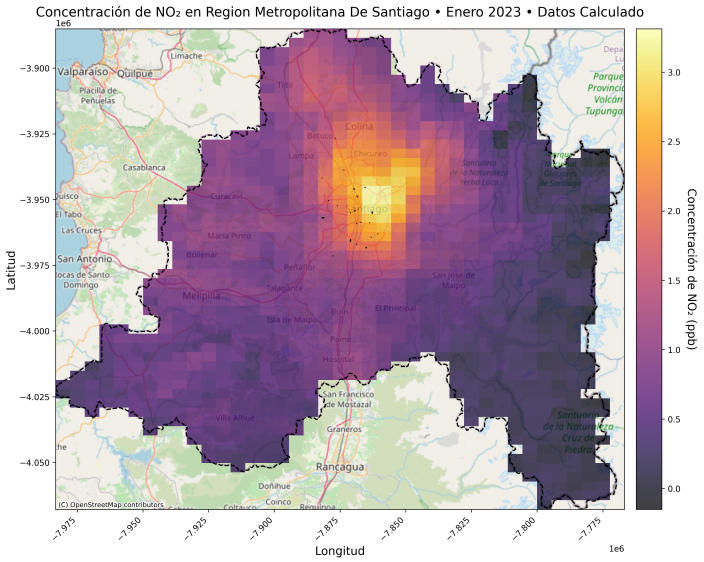


Figura 3.6: Mapa de concentración superficial **PPB** de NO_2 tras procesamiento mediante (1.5) por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

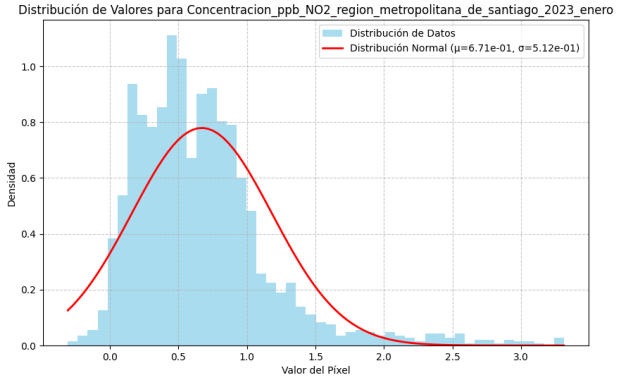


Figura 3.7: Histograma de densidad de datos de concentración superficial **PPB** de NO_2 tras procesamiento mediante (1.5) por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

Statistic	Value
Minimum	-0,3076575
Maximum	3,312558
Mean	6,707e-01
Std Dev	5,119e-01
Data Points	1976

Cuadro 3.3: Resultados estadísticos de datos de concentración superficial **PPB** de NO_2 tras procesamiento mediante (1.5) por solicitud: Promedio mensual Enero-2023, Región Metropolitana.

3.2. Análisis de rendimiento del algoritmo de descarga

Una vez realizada la descarga y el procesamiento de la totalidad de los datos disponibles para el periodo comprendido entre 2018 y 2024. Estos registros fueron agrupados y expuestos en función de su concentración y densidad, correlacionando el periodo temporal con la distribución regional administrativa de Chile.

Como punto inicial es clave estudiar y analizar el rendimiento del método de descarga, ya sea por la concentración de datos registrada por el satélite, o la cantidad de datos obtenida para la zona de interés en el periodo estudiado.

A continuación, se presenta un gráfico que ilustra la cantidad de datos válidos disponibles por región para el intervalo analizado:

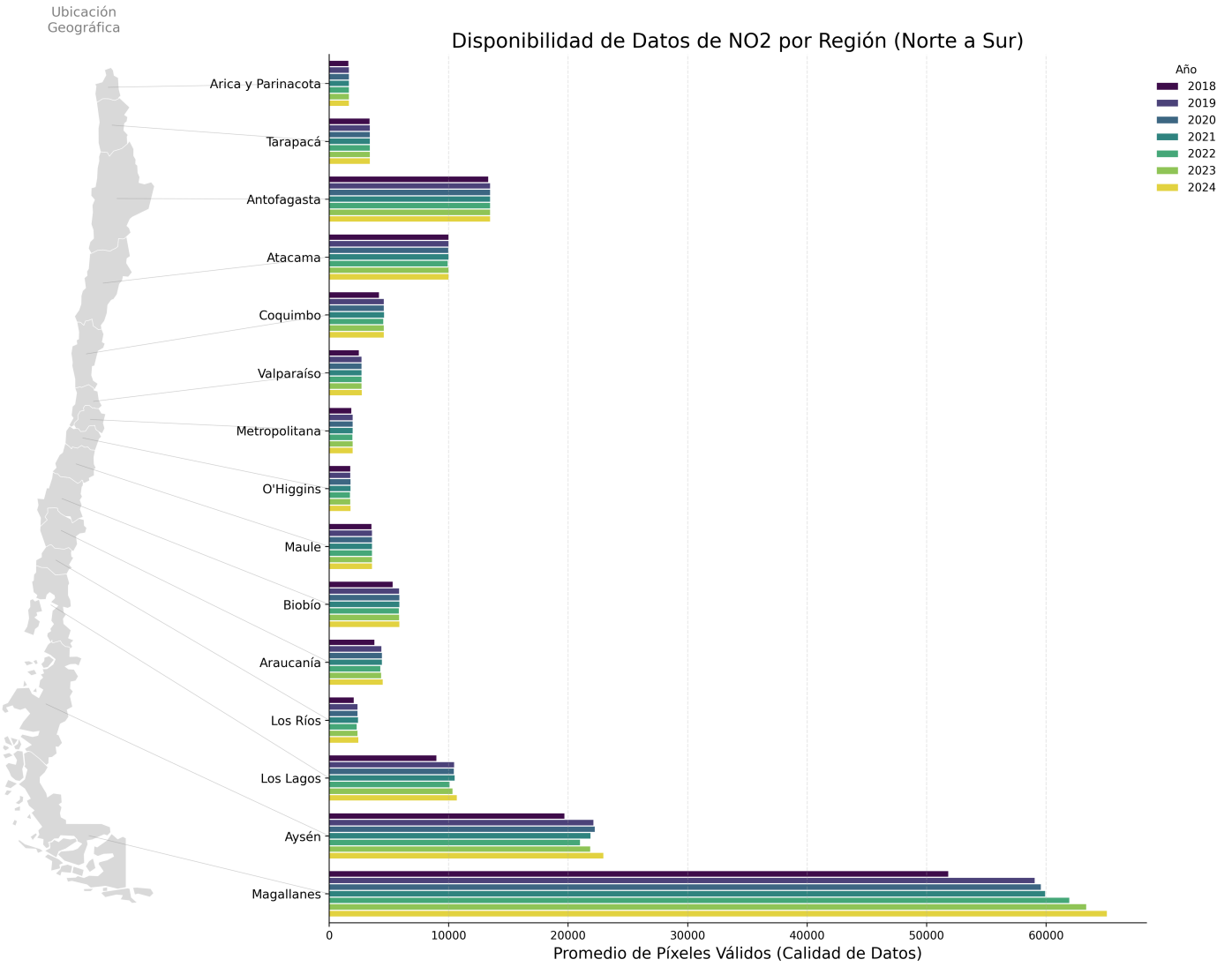


Figura 3.8: Cantidad de píxeles válidos de NO_2 descargados por región y año (2018-2024) mediante *TROPOMI*.

En la Figura 3.8 se aprecia la variabilidad en la cantidad de datos presentes por región, evidenciando una conexión directa entre la ubicación geográfica y el volumen de información recuperada. Se observa una disparidad significativa, donde ciertas regiones poseen un caudal de datos inmensamente superior al de sus vecinas o al promedio nacional. Tras el análisis, se determinó la existencia de tres factores determinantes que influyen en esta disponibilidad: la superficie

territorial, la ubicación latitudinal y el filtrado por calidad de datos (QA). Respecto a este último, los datos de Sentinel-5P están etiquetados con valores de calidad ($\mathrm{qa\_value}$), donde el parámetro minQa establece el umbral mínimo (inclusive) en porcentaje para la visualización (por ejemplo, establecer minQa = 75 implica que solo se desplegarán píxeles con un $\mathrm{qa\_value} \geq 75\,\%$).

Influencia de la Superficie Territorial

El primer factor corresponde a la extensión física de la zona de estudio. Se observa que la región de Magallanes exhibe la mayor disponibilidad de datos, con un comportamiento creciente que oscila entre más de 52.000 y 65.000 registros a lo largo del periodo. Esto es consistente con su condición de ser la región más extensa del país, con una superficie aproximada de $132.297\left[\mathrm{km}^2\right]$.

No obstante, la superficie no actúa como un predictor aislado. La región de Aysén, pese a ser la tercera más extensa con $108.494\left[\mathrm{km}^2\right]$, presenta aproximadamente un tercio del volumen de datos de su vecina austral, lo que sugiere la intervención de variables adicionales.

Validación de Datos y Condiciones Meteorológicas

Un segundo factor crítico es la cantidad de validaciones exitosas durante el periodo. La configuración inicial del algoritmo estableció un filtro de $\mathrm{Quality\ Assurance}$ (QA) superior a 0,75, garantizando un aseguramiento de calidad del 75 %. Bajo este criterio, cualquier medición afectada por nubosidad o falta de validez respecto al estándar del programa Copernicus es descartada.

Este fenómeno explica la alta densidad de datos en la zona norte. Las regiones de Antofagasta ($126.049\left[\mathrm{km}^2\right]$) y Atacama ($75.176\left[\mathrm{km}^2\right]$), caracterizadas por condiciones desérticas y baja nubosidad, permiten una tasa de recuperación de datos superior. La aridez del Norte Grande y Chico facilita la visualización satelital continua, en contraste con zonas de mayor inestabilidad atmosférica.

Factor Geográfico y Orbital

Finalmente, la ubicación latitudinal constituye un factor fundamental. La preponderancia de la región de Magallanes en la densidad de información —radicalmente superior al resto— obedece a su proximidad al polo sur. Dada la naturaleza de la órbita polar de los satélites (como el Sentinel-5P que aloja al sensor TROPOMI), las franjas de barrido se solapan con mayor frecuencia en latitudes altas.

Tal como describe [Natural Resources Canada, 2015], aunque el ancho de la franja ($\mathrm{swath\ width}$) se mantiene constante, la rotación terrestre provoca un desplazamiento lateral de la trayectoria del satélite en cada órbita. Debido a la geometría esférica de la Tierra, estas trayectorias convergen a medida que se acercan a los polos, lo que genera un solapamiento significativo de las imágenes adyacentes. Este fenómeno resulta en una mayor frecuencia de revisita temporal para zonas australes en comparación con las regiones ecuatoriales, donde el solapamiento lateral es mínimo o inexistente.

En consecuencia, el ordenamiento de disponibilidad de datos se configura de la siguiente manera:

- En primer lugar, la región de $\mathrm{Magallanes}$, potenciada por la convergencia orbital polar y su vasta superficie.
- En segundo lugar, la región de $\mathrm{Aysén}$, beneficiada por su latitud y extensión, aunque limitada por factores meteorológicos.

- En tercer lugar, la región de Antofagasta, destacada por la ausencia de obstrucciones visuales (nubes) y su gran extensión territorial.

- En un cuarto nivel se observa una paridad entre la región de Atacama y la región de Los Lagos (48.583$[\mathrm{km}^2]$). A pesar de sus diferencias latitudinales y a su diferencia superficial, ambas presentan volúmenes de datos similares siguiendo las condiciones de validación atmosférica.

3.3. Información obtenida de los registros de concentración de NO_2

3.3.1. TROPOMI: Columna troposférica de NO_2

Para la visualización de los datos considerados como la concentración de la columna troposférica a lo largo del proceso, se realizó la diagramación de series temporales correspondientes a una línea o curva central que sigue el comportamiento de la mediana de los datos registrados mensualmente.

Para complementar el comportamiento de los datos a lo largo de los meses, se incluyó el percentil 90 ($P90$). De esta forma es posible abarcar el mayor porcentaje de datos presentes en el análisis de manera general, sin caer en los extremos del rango contemplado. Se presenta el siguiente ejemplo correspondiente a la región Metropolitana de Santiago de todo el periodo

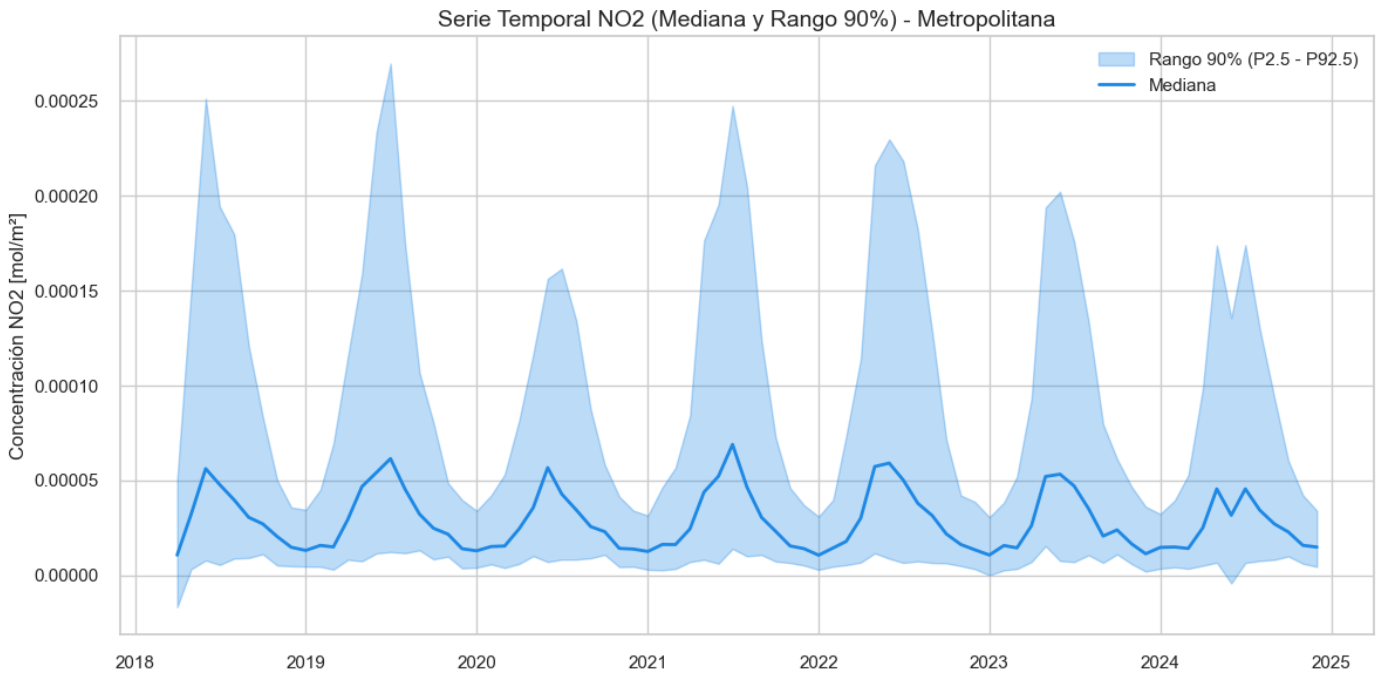


Figura 3.9: Serie temporal de la mediana de los registros en conjunto al $P90$ dispuesto para Región Metropolitana en el periodo 2018-2024.

Considerando la influencia de las condiciones meteorológicas, resulta pertinente destacar el marcado comportamiento estacional presente en los datos, destacando los altos picos alcanzados en los meses de invierno, esto debido muy posiblemente a la acumulación de contaminantes en cúmulos nubosos y en la humedad ambiental.

En la Figura 3.10, se presenta el ciclo anual del promedio de las medianas de NO_2 registradas durante el periodo de estudio. En dicho gráfico, se aprecia una elevada concentración en las regiones de la zona central, evidenciándose un incremento significativo en la Región Metropolitana, donde la mediana asciende aproximadamente $2 \times 10^{-5} \left[\mathrm{mol/m^2}\right]$ entre los meses de abril y mayo.

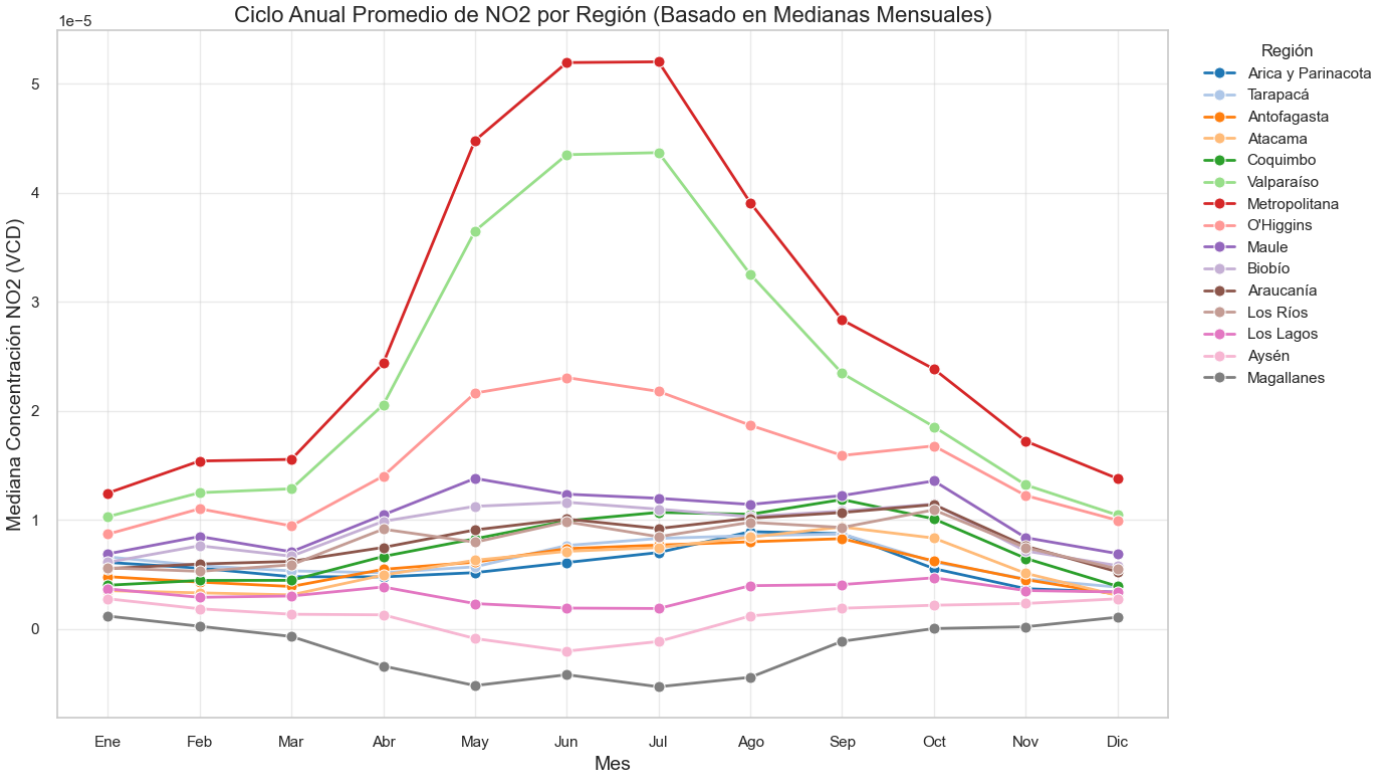


Figura 3.10: Ciclo anual de concentraciones de NO_2 en columna troposférica obtenido desde *TROPOMI* (Promedio de medianas obtenidas).

A partir de estos resultados, se enfatiza la relevancia de la variabilidad estacional al analizar la concentración en la columna troposférica. Los meses de otoño e invierno en Chile, caracterizados por una mayor nubosidad en las regiones Metropolitana y de Valparaíso, coinciden con los niveles máximos de acumulación del gas. Este comportamiento responde principalmente a la estabilidad atmosférica (inversión térmica) y a la menor tasa de fotólisis durante este periodo, factores que favorecen la permanencia del dióxido de nitrógeno en la atmósfera, tal como se describe visualmente en la gráfica.

3.4. Contraste de registros de ambas fuentes

3.4.1. Análisis por Coeficiente de Pearson

Se procedió al análisis de correlación de datos mediante el coeficiente de Pearson. Este método permite determinar si la concentración de datos tiende a converger, mantenerse independiente o diverger entre las distintas fuentes de información. A continuación, se presentan los diagramas estadísticos resultantes.

La Figura 3.11 exhibe la matriz de correlaciones de Pearson por estación, ordenada geográficamente de norte a sur.



Figura 3.11: Matriz de correlaciones de Pearson por estación ordenada geográficamente de norte a sur.

En ella se observan los coeficientes de Pearson correspondientes a las correlaciones entre variables bidireccionales; específicamente, el contraste entre las mediciones de TROPOMI y los registros del SINCA para los periodos descritos.

Es relevante destacar la limitación existente en los datos del año 2018, cuyo primer registro data del 30 de abril. El algoritmo de descarga asimiló el registro puntual diario de dicha fecha como el promedio mensual, lo cual genera una distorsión que no es representativa del comportamiento total del periodo. En consecuencia, no fue factible realizar un análisis anual riguroso para dicho año, dado que el primer tercio del periodo carece de registros válidos para establecer una correlación con la solidez lograda en el resto del lapso estudiado.

Para el período completo analizado, se obtuvo el resultado correspondiente a la correlación general promediada, el cual se presenta a continuación:

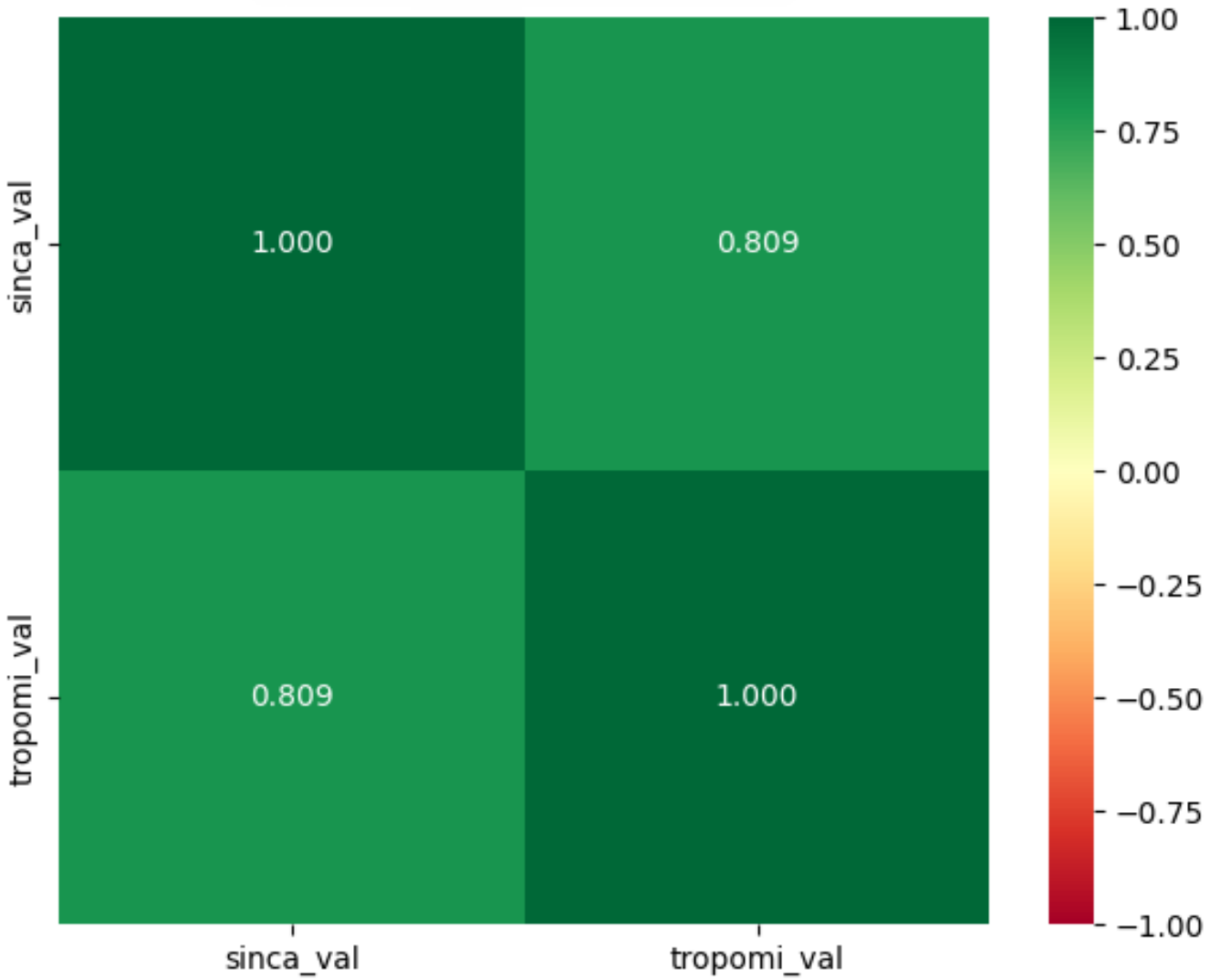


Figura 3.12: Matriz de correlaciones promediadas para Chile según las regiones estudiadas (sinca_val ≡ ”Valores de SINCA”; tropomi_val ≡ ”Valores de TROPOMI”.

El análisis arrojó una correlación aproximada de 0,81, cifra ampliamente superior a la meta establecida en la metodología. Esto indica un comportamiento idóneo para el contraste entre fuentes diversas.

De forma complementaria, se estudiaron series temporales por estación que permitieron analizar si el comportamiento de ambas fuentes concordaba o no con la correlación de Pearson mencionada.

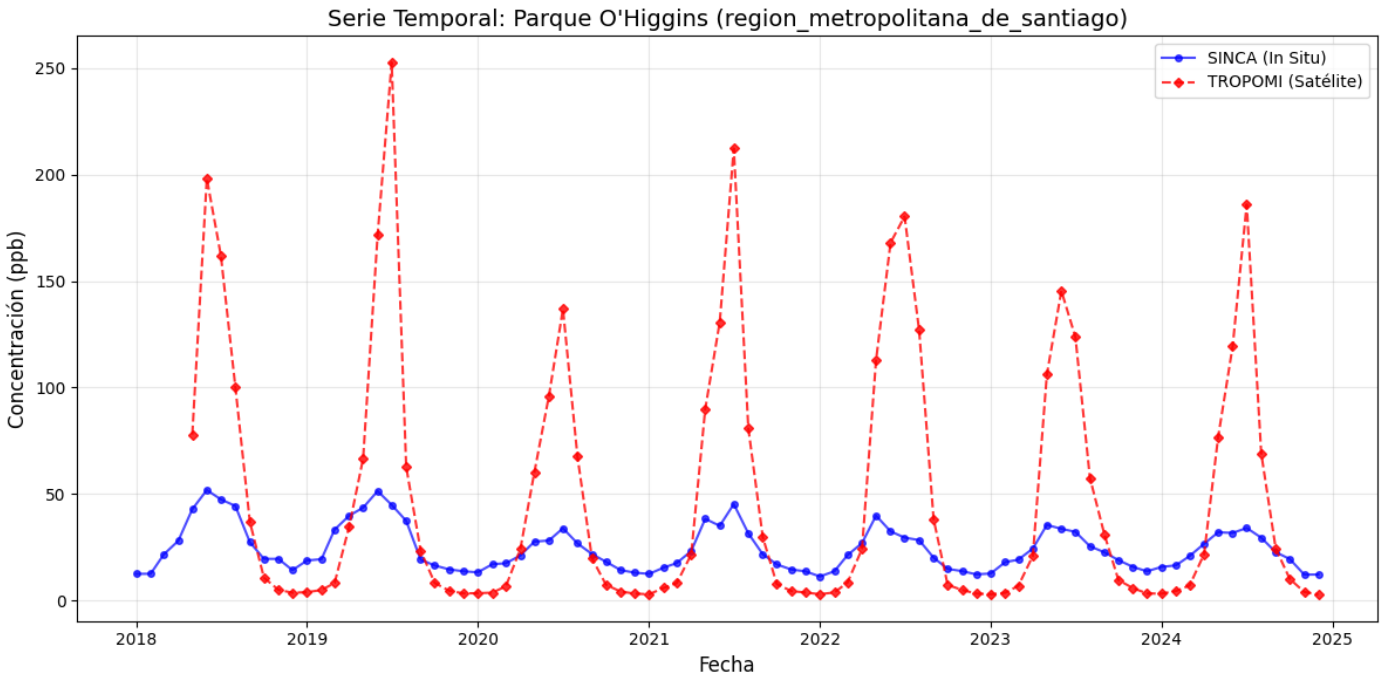


Figura 3.13: Serie temporal de contrastes periodo completo, Región Metropolitana, estación Parque O'Higgins

Para visualizar la distribución espacial de estas correlaciones, se elaboraron mapas comparativos de ambas fuentes, analizando su comportamiento en dos meses puntuales con una diferencia de cuatro años: septiembre de 2019 y septiembre de 2023.

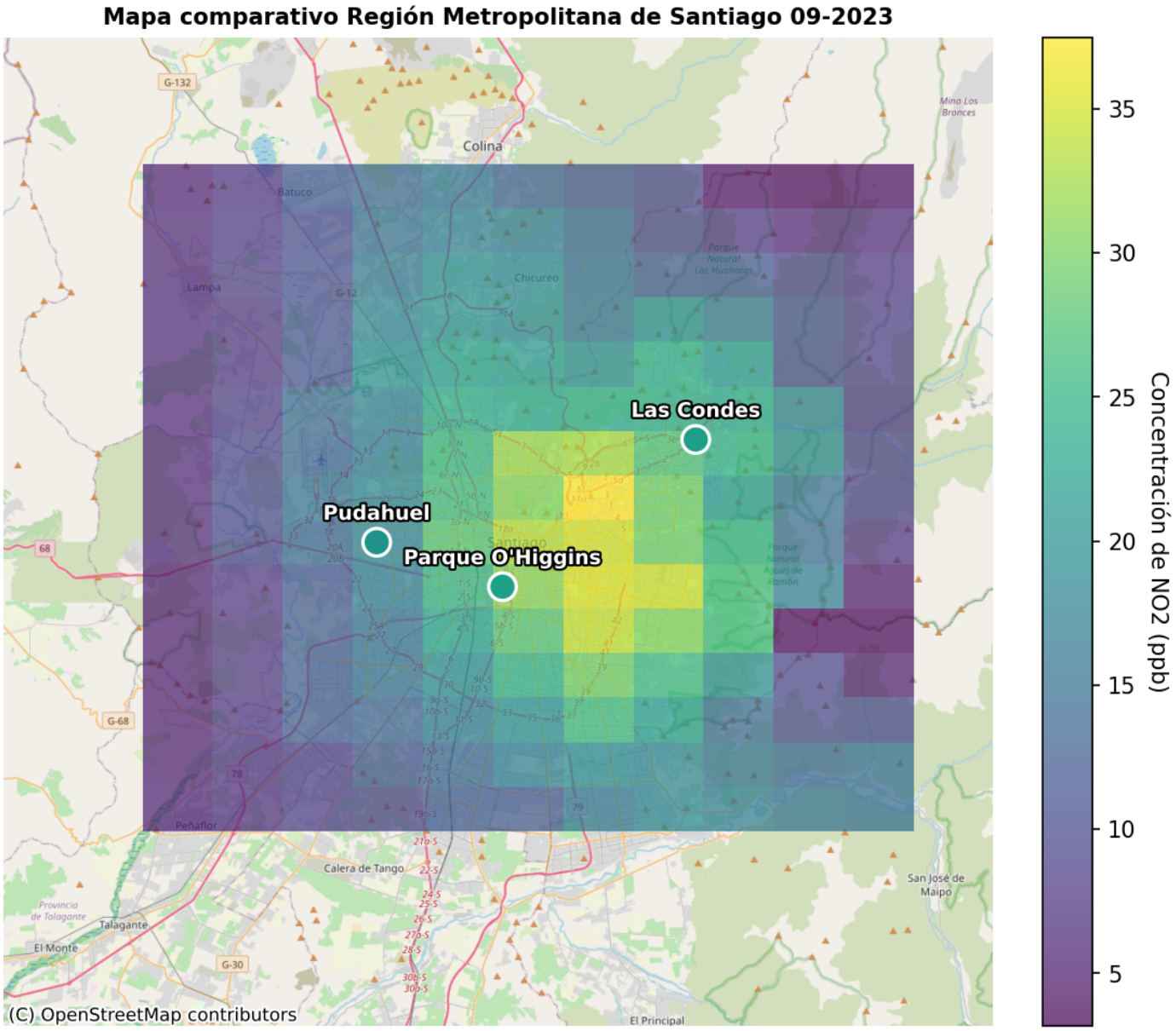


Figura 3.14: Mapa comparativo de concentración superficial de registros en terreno (SINCA: círculos) y datos satelitales transformados (TROPOMI: mapa de calor).

Mediante este contraste visual, se corrobora nuevamente la cercanía de los datos en las regiones estudiadas, permitiendo identificar la concordancia de los valores y determinar si se encuentran dentro del rango admisible.

3.4.2. Análisis por diagrama de dispersión

Adicionalmente a la correlación de Pearson, se examinó el comportamiento de los datos mediante diagramas de dispersión. Estos permiten estudiar las coordenadas correspondientes al par de datos (TROPOMI, SINCA), ubicándolas en el plano cartesiano para establecer tendencias y analizar la incidencia de los datos respecto a sus valores adyacentes.

En este tipo de gráficos, la concentración de datos establece una tendencia que determina la distancia respecto a la recta

1:1. Cabe recordar que la recta 1:1 representa un comportamiento exactamente parejo, donde los datos son directamente proporcionales. Si la curva o recta descrita por los datos se inclina o desplaza, indica un alejamiento de la proporcionalidad directa.

Al estudiar la correlación respecto a la línea de tendencia, se aprecia que esta varía según la región. En el caso de la Región Metropolitana, se alcanzó un valor óptimo con una correlación correspondiente a $0,81$. Pese a desviarse levemente de la línea de tendencia 1:1, describe un comportamiento alineado entre los datos terrenales y satelitales.

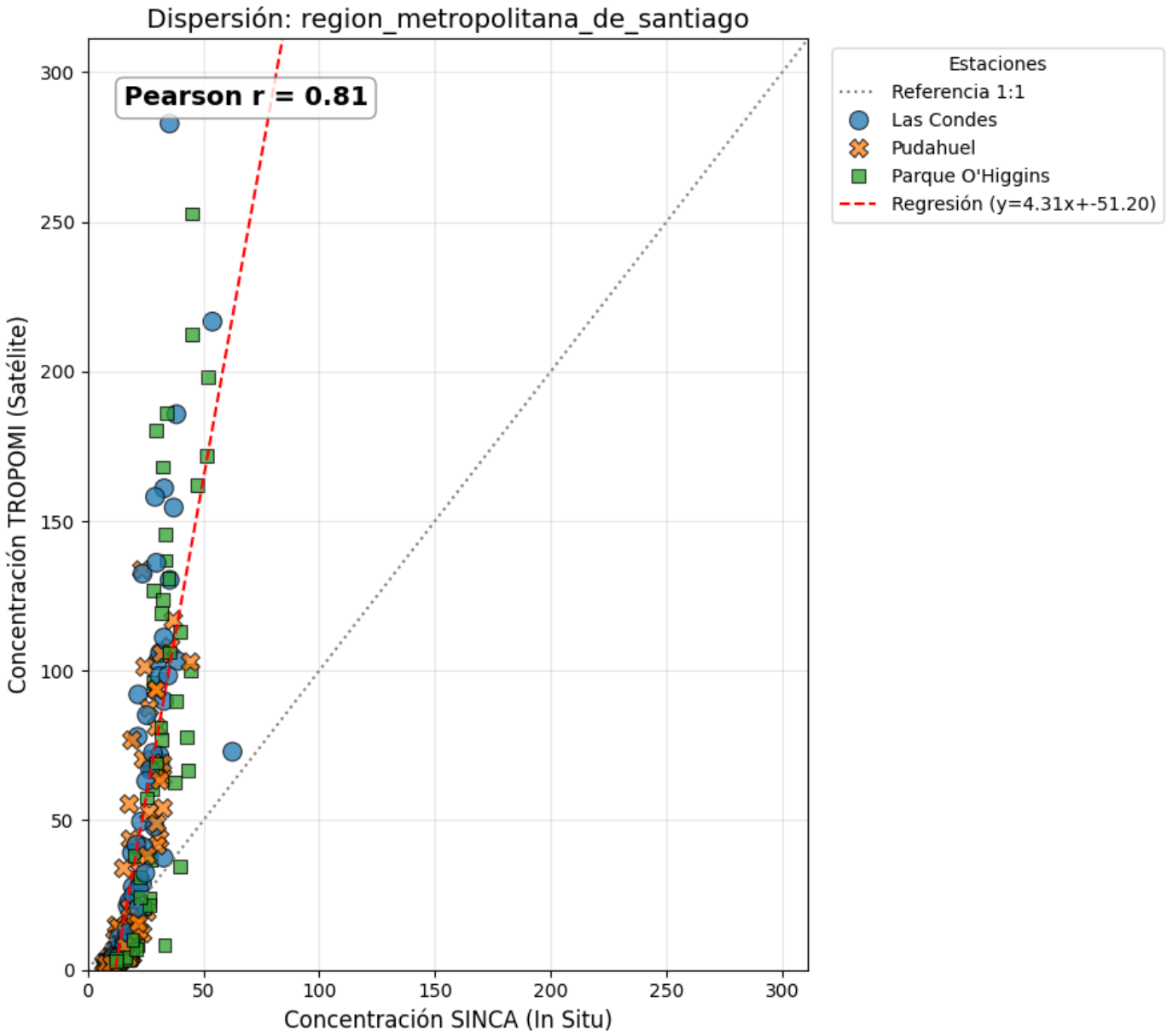


Figura 3.15: Diagrama de dispersión de datos correspondiente a la Región Metropolitana para el periodo completo.

3.4.3. Análisis por Diagramas de caja y bigote

Finalmente, se elaboraron gráficos de caja y bigote (boxplots), los cuales permiten estudiar el comportamiento del rango de datos, la mediana y la concentración relativa de las mediciones. Debido al carácter agrupado de este gráfico, el análisis se realizó por año, estudiando específicamente las estaciones correspondientes.

A modo de ejemplo, se presenta el análisis de la Región Metropolitana para los años estudiados:

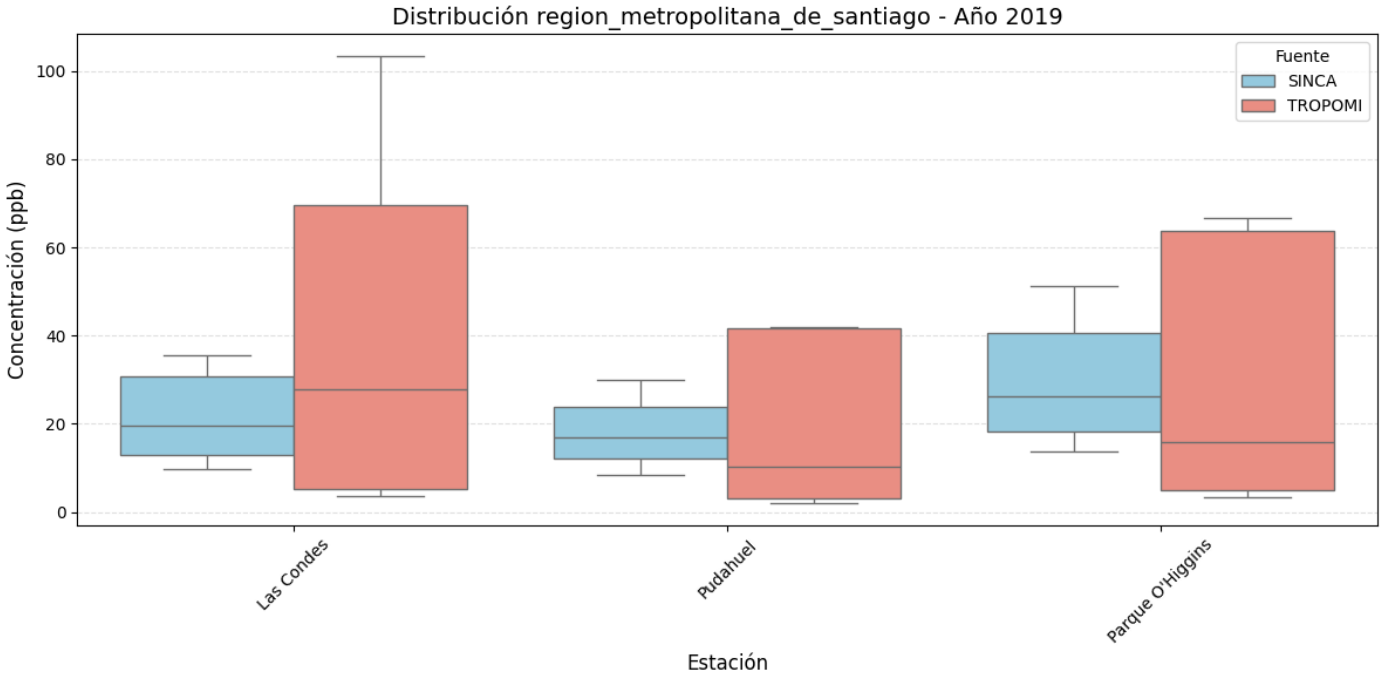


Figura 3.16: Boxplot comparativo de estaciones de monitoreo (azul) y registros satelitales (naranjo) en Región Metropolitana durante 2019.

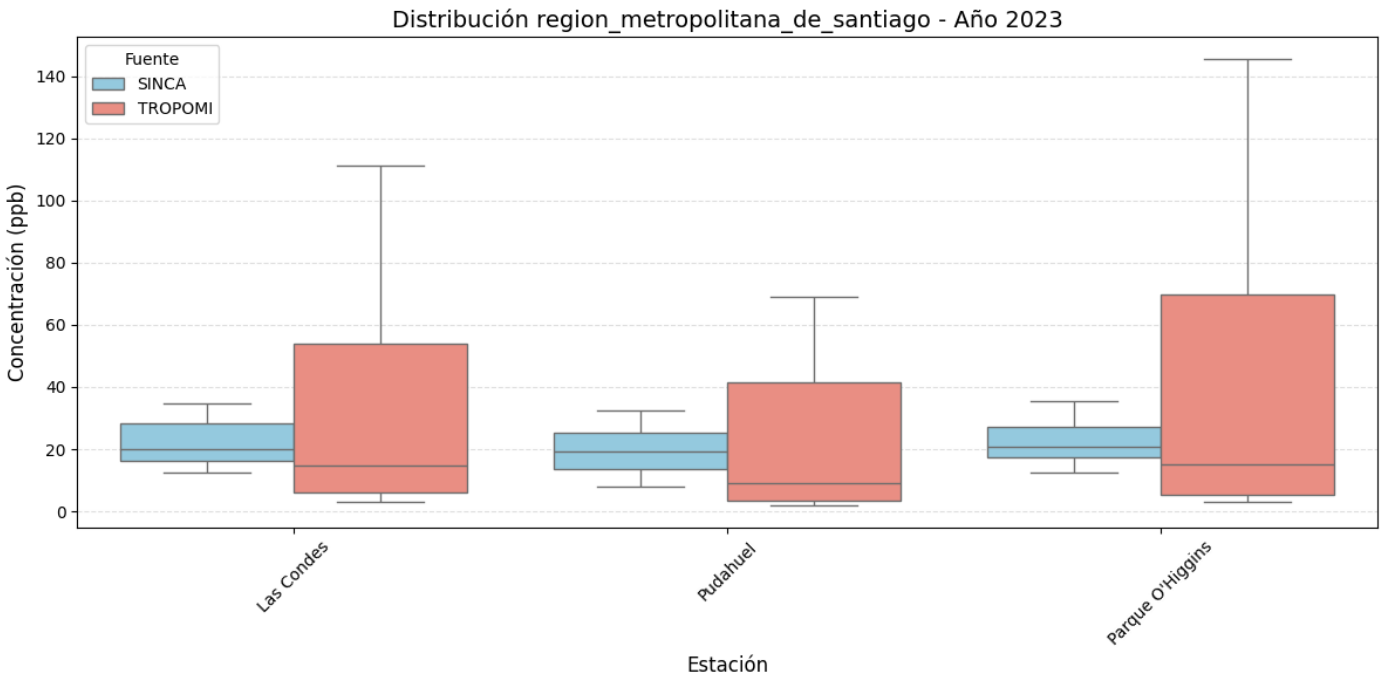


Figura 3.17: Boxplot comparativo de estaciones de monitoreo (azul) y registros satelitales (naranjo) en Región Metropolitana durante 2023.

Los diagramas restantes obtenidos durante el estudio se adjuntan en el anexo para su posterior visualización.

3.5. Discusión de resultados

3.5.1. Valor agregado y representatividad de la muestra

Un aporte distintivo de esta investigación radica en la magnitud y exhaustividad del proceso de validación. Se llevó a cabo una búsqueda y selección manual rigurosa de estaciones de monitoreo, priorizando aquellas que ofrecieran una alta representatividad geográfica y una densidad de datos robusta.

Es fundamental destacar que, en la literatura existente para la región, nunca antes se había integrado una cantidad tan extensa de estaciones como fuente de contraste para estudios de esta naturaleza. Esta amplitud inédita en la base de datos in situ fortalece la significancia estadística de las correlaciones y valida la aplicabilidad del método de transformación satelital en diversos contextos topográficos y urbanos de Chile.

3.5.2. Validación de la metodología de transformación y correlación

Los resultados obtenidos evidencian una correlación positiva altamente directa entre las bases de datos satelitales y las mediciones in situ, destacando la constancia y regularidad de las estaciones monitoreadas en la Región Metropolitana. Se alcanzaron coeficientes de correlación de 0,97 en Pudahuel en 2023, 0,96 en Las Condes en 2022 y 0,95 en Parque O'Higgins 2022. Estas magnitudes permiten concluir que el método aplicado para la transformación de la columna troposférica a concentración superficial es altamente eficaz, cumpliendo con el objetivo de elaborar un proceso de conversión robusto.

Queda en evidencia que, ante una cantidad óptima de datos validados, el sistema satelital representa correctamente el comportamiento del NO_2 en función de su zona geográfica.

3.5.3. Eficiencia computacional y resolución temporal en datos validados

Respecto al tratamiento temporal de la información, el análisis se restringió a medias mensuales, excluyendo el estudio de datos puntuales diarios. Esta decisión metodológica responde a una configuración de descarga diseñada para obtener directamente los promedios desde la plataforma TROPOMI.

Este enfoque resulta computacionalmente mucho más eficiente y ligero que la alternativa de descargar, almacenar y procesar los registros individuales diarios para posteriormente calcular las medias. Si bien esta configuración optimiza sustancialmente el flujo de trabajo y reduce la carga de procesamiento para series temporales extensas (2018-2024), conlleva la limitación intrínseca de no permitir la detección de variaciones agudas o eventos de contaminación de corta duración que se diluyen en el promedio mensual.

Sin embargo, hay escenarios en los cuales no se obtienen correlaciones óptimas entre ambas fuentes de datos. Como ejemplo, en la Región de Valparaíso, y en particular en la estación ubicada en Los Andes, se aprecia un decrecimiento abrupto del año 2019 al 2020, pasando de una correlación directa y casi perfecta de 0,99 a una del 0,72 y con valores aún menores en años posteriores (0,59 en 2023 y 0,36 en 2024) 3.11. De esta manera, se aprecia que no siempre el método es exacto para analizar el comportamiento de los datos en cuestión. Factores ambientales como la presencia de nubes o la velocidad del viento pueden estar afectando la toma de datos satelitales. Desfasando sus magnitudes de manera significativa alejando las mediciones del comportamiento real detectado por SINCA.

3.5.4. Incidencia de la calidad de los datos: preliminares y no validados

El análisis de sectores con densidad de datos exclusivamente preliminar o no validada revela una mayor incertidumbre:

- Datos preliminares: Aunque la correlación disminuye respecto a los datos validados, la tendencia se mantiene positiva. En Kingston College (Biobío) C.9, con 1,0 de datos preliminares, se logró una correlación superior al 0,70 en gran parte del periodo. Por el contrario, en Consultorio San Vicente C.8, la predominancia de datos preliminares coincidió con una baja correlación (0,21 en 2022), sugiriendo que la condición ”preliminar”no garantiza la certeza del buen funcionamiento de los equipos.

- Datos no validados: En escenarios como el Super Site de Antofagasta (92,2 % no validada) 2.5 C.1, las magnitudes de correlación fueron muy bajas o incluso inversas (2019). Sin embargo, excepciones como Puchuncaví C.3 (0,95 de correlación en 2023 pese a datos no validados) indican que la falta de validación administrativa no siempre implica un error instrumental, aunque añade incertidumbre al modelo.

3.5.5. Factores ambientales y limitaciones de la detección

En la estación Los Andes se observa una tendencia decreciente en la correlación, pese a conservarse la estacionalidad (Figura A25). El comportamiento de los registros satelitales tiende a ser más abrupto debido a factores meteorológicos. Dado que el NO_2 es soluble en agua, la nubosidad y la humedad pueden obstruir la visión del sensor o alterar la lectura de la columna, lo que explica las diferencias de amplitud respecto a los registros in situ, especialmente en invierno.

3.5.6. Análisis de dispersión

- Región de Valparaíso: Se aprecia una alta coherencia y una tendencia alineada con la recta 1:1, con un factor de correlación general del 0,54 D.2, denotando alta validez.
- Región del Biobío: La correlación respecto a la línea de tendencia es menor (0,44) D.3, sugiriendo mayor dispersión.

3.5.7. Conclusiones de la discusión

El análisis del mapa complementario F.6 demuestra que, con bases de datos validadas, las concentraciones de SINCA y TROPOMI presentan una gran similitud visual y numérica. Esto valida el método como un complemento directo para completar información donde no hay estaciones operativas, consolidando a TROPOMI como una alternativa robusta para ampliar el rango de registro del NO_2 en Chile. Sin embargo, la falta de regularidad o tendencia en las correlaciones a lo largo de las regiones restringe el uso de esta validación, más aún considerando la clara independencia e incluso divergencia en comportamiento si la base de datos posee una amplia densidad de registros no validados. Por ende, mientras no se regularice la validación de datos en estaciones de monitoreo, se recomienda centrar el uso de este modelo en estaciones con una concentración de datos validados mayor al 0,90 y un correlación de fuentes cruzadas mayor al 0,80. Por lo que se recomienda un estudio de esta metodología aplicado únicamente a la Región Metropolitana, pues, es aquella que posee el mayor porcentaje de estaciones controladas para mantener su buen funcionamiento.

3.6. Observaciones

Considerando los hallazgos sobre la eficiencia del procesamiento de datos, se sugiere:

1. Estrategia de Descarga de Datos: Para estudios que busquen establecer tendencias a largo plazo, estacionalidad o patrones anuales, se recomienda mantener la configuración de descarga de medias mensuales directas. Esta metodología ha demostrado ser altamente eficiente en términos computacionales, permitiendo el manejo de grandes volúmenes de información espacial sin sobrecargar la infraestructura de procesamiento.
2. Análisis de Eventos Agudos: En caso de que futuras investigaciones requieran analizar episodios críticos de contaminación o variaciones diarias específicas en periodos extensos, será necesario modificar el protocolo de descarga para obtener los datos brutos diarios (Level 2) para agruparlos según los periodos solicitados y procesarlos según la necesidad del estudio. No obstante, se debe prever que esto requerirá una capacidad de almacenamiento y potencia de cálculo significativamente mayor.
3. Validación de Datos: Se recomienda priorizar el uso de datos validados del SINCA para la calibración de modelos satelitales, dado que la incertidumbre introducida por datos preliminares o no validados puede generar divergencias significativas en las correlaciones.

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones generales

En correspondencia con los objetivos planteados para esta investigación, es posible determinar que el proceso de descarga y transformación de datos satelitales se establece no solo como una alternativa, sino como un complemento eficaz a los registros realizados por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

En relación con el análisis de las concentraciones de NO_2 y la elaboración del proceso de transformación de datos troposféricos a superficiales, se concluye que la ecuación de Savanets constituyó un planteamiento óptimo para la conversión de datos. La utilización de una nueva altitud para transformar los datos fue esencial para alcanzar valores altamente representativos de la realidad nacional. De esta forma, si surge la necesidad de realizar simulaciones químicas o utilizar modelos de machine learning y transporte, la metodología empleada queda validada gracias a una correlación de Pearson que supera en seis unidades el estándar de 0,75 planteado inicialmente en la metodología de trabajo.

Respecto al contraste de los resultados satelitales con las mediciones superficiales, se observó una correlación prácticamente directa, alcanzando valores cercanos a 0,81 en términos del coeficiente de Pearson a nivel general. Cuando existe un alto porcentaje de datos validados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), el satélite logra detectar la misma tendencia y comportamiento de las concentraciones que la red de monitoreo en los sectores analizados. Específicamente, estaciones como Las Condes o Parque O'Higgins presentaron una correlación cercana al 100 %.

Sin embargo, las dificultades técnicas inherentes al periodo de estudio supusieron limitaciones. Dado que el satélite TROPOMI inició sus registros el 30 de abril de 2018 y que diversas estaciones sufrieron modificaciones, apagones o fallas técnicas, el análisis de regiones como Antofagasta y Valparaíso resultó menos certero respecto a la realidad, debido a que la mayoría de las estaciones en dichas zonas no presentaron una cantidad óptima de datos validados para el contraste. Asimismo, la calibración de datos durante el año 2018 afectó gran parte de los registros de ese periodo, por lo que su inclusión en análisis geoespaciales futuros debe interpretarse con cautela.

Finalmente, en cuanto a la generación de una base de datos y herramientas de acceso, la implementación de una interfaz de usuario, que se puede encontrar en este enlace, representó una mejora significativa en la accesibilidad para la descarga y procesamiento de datos, ante la inexistencia de un método estandarizado previo. Esto facilitó la generación de avances en formato `GeoTIFF` y la agrupación de datos, permitiendo que cualquier interesado en el rubro pueda acceder a la información de manera rápida y sin requerir instrucciones complejas de programación.

4.2. Cumplimiento de objetivos

Analizar las concentraciones de NO_2 en todas las regiones de Chile durante el período 2018-2024, a partir de datos obtenidos por sensores satelitales

El desarrollo de la investigación dio cumplimiento al primer objetivo específico al lograr un análisis exhaustivo de las concentraciones de $\mathrm{NO_2}$ en todas las regiones del país para el periodo 2018-2024. Se evaluó el rendimiento del algoritmo de descarga, identificando que la disponibilidad de datos válidos está fuertemente condicionada por factores geográficos y orbitales, destacando regiones extremas como Magallanes con una mayor densidad de registros.

Respecto al comportamiento del gas, se confirmó un marcado ciclo estacional en la zona central (Regiones Metropolitana y de Valparaíso), con concentraciones máximas durante los meses de otoño e invierno. Este fenómeno se demostró vinculado principalmente a la estabilidad atmosférica (inversión térmica) y la menor tasa de fotólisis características de dicho periodo, las cuales favorecen la acumulación de contaminantes. Finalmente, se identificó que la alta humedad y nubosidad del entorno, sumadas a la propiedad de solubilidad en agua del $\mathrm{NO_2}$, actúan como factores incidentes que pueden obstruir la detección del sensor o alterar las lecturas de la columna troposférica, explicando las variaciones de amplitud observadas respecto a los registros en superficie durante los meses más húmedos.

Elaborar un proceso de transformación de datos troposféricos a concentraciones superficiales, mediante un enfoque de conversión columna-superficie

Mediante la adaptación y ajuste de la ecuación (1.5), basada en la propuesta de Savenets (2021), logrando implementar una metodología robusta, eficiente y de bajo costo computacional para la conversión columna-superficie. Al conceptualizar la columna troposférica como un volumen de control geométrico, la normalización de la densidad columnar mediante la altura de la capa límite planetaria (BLH) —obtenida dinámicamente del reanálisis ERA5— permitió realizar una transformación de unidades físicas que preserva la integridad de la información satelital cruda (Nivel 2), generando productos de concentración superficial consistentes para su posterior análisis y validación (Nivel 3).

Contrastar los resultados satelitales con mediciones superficiales de la red de monitoreo SINCA para cuatro ciudades de relevancia nacional.

A partir del análisis de correlación de Pearson (r) aplicado a las series temporales de las regiones de Antofagasta, Valparaíso, Metropolitana y Biobío. Los resultados validaron el uso complementario de ambas fuentes, obteniendo un coeficiente de correlación promedio general cercano a 0,81, superando el umbral de aceptación metodológico del 0,75.

Sin embargo, el contraste evidenció una dicotomía crítica dependiente de la calidad del dato terrestre. En zonas con alta densidad de registros validados", específicamente en la Región Metropolitana, se observó una sincronía casi perfecta entre el satélite y las estaciones de monitoreo, alcanzando valores de correlación excepcionales en estaciones como **Pudahuel ($r \approx 0,97$ en 2023)** y **Las Condes ($r \approx 0,96$ en 2022)**. Esto respalda la robustez del método de transformación en entornos donde la infraestructura de monitoreo opera bajo estándares normativos rigurosos.

Por el contrario, en regiones con predominancia de datos "preliminares.º "no validados", como **Antofagasta** y sectores del **Biobío**, la correlación disminuyó significativamente, mostrando un comportamiento errático o divergente. Esta incertidumbre no necesariamente implica un error en la medición satelital, sino que expone las falencias de contrastar un modelo físico calibrado frente a registros terrestres que carecen de certificación administrativa o manteni-

miento constante. En consecuencia, se recomienda restringir la aplicación de este modelo de calibración a estaciones con una magnitud de validación superior a 0,90, y utilizar las estimaciones de Sentinel-5P (TROPOMI) como fuente primaria de información en aquellas zonas donde la red SINCA presente vacíos de información o discontinuidad operativa, garantizando así un control de emisiones continuo e independiente.

Generar una base de datos de concentraciones de NO_2, para las regiones Metropolitana de Santiago y de Valparaíso, orientadas a estudios de impacto en la salud de la población.

El cumplimiento de este objetivo se materializó mediante la consolidación y publicación de una base de datos de concentraciones superficiales para las zonas de estudio, la cual transforma las densidades de columna troposférica en unidades físicas compatibles con normativas de salud ($\mu g/m^3$).

Para garantizar la utilidad pública y la reproducibilidad de la investigación, se desarrolló y liberó una herramienta de software de código abierto que automatiza la descarga, procesamiento y conversión de los datos de Sentinel-5P. Este desarrollo elimina las barreras técnicas asociadas al manejo de APIs satelitales y lenguajes de programación avanzados, permitiendo que profesionales del área de la salud y gestores ambientales accedan a series temporales actualizadas de forma autónoma. Tanto la base de datos histórica como el código fuente y sus manuales de operación se encuentran disponibles en el siguiente repositorio:

`https://github.com/joaquinfernandezv-star/Descargador_TROPOMI.git`

4.3. Recomendaciones

A la luz de los hallazgos y limitaciones detectadas en esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y para la gestión de la información ambiental:

Respecto al análisis de datos y contaminantes

Se sugiere replicar este análisis utilizando la correlación de Pearson para otros contaminantes de interés, tales como material particulado ($PM_{2.5}$), hidrocarburos o dióxido de azufre (SO_2). Asimismo, es recomendable realizar un análisis de sensibilidad para determinar la altitud precisa que permita transformar los datos satelitales para que coincidan con exactitud con las estaciones de monitoreo validadas.

Respecto al instrumento TROPOMI y procesamiento satelital

Queda en evidencia que el instrumento TROPOMI es susceptible a condiciones ambientales, donde la estacionalidad y la alta concentración de nubosidad pueden alterar las lecturas de concentración. Por tanto, se recomienda:

- Revisar la incidencia de factores adicionales en la ecuación utilizada, como la velocidad del viento [Morillas López, 2024] o la concentración de nubosidad, considerada uno de los factores más importantes de obstrucción en la detección de datos.
- Profundizar en el uso de las librerías de procesamiento interno de TROPOMI, ya que al ser de código abierto, permiten plantear nuevos escenarios de descarga y procesamiento que favorecen una investigación más exhaustiva.

Respecto al Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)

Las limitaciones técnicas de la plataforma del SINCA dificultaron el análisis temprano de los datos. En este sentido, se recomienda a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA):

- Reformular la metodología de descarga de la página web, favoreciendo la georreferenciación. Actualmente, la entrega exclusiva de series temporales sin coordenadas explícitas (latitud-longitud) en la base de datos descargable impide un análisis espacial completo del entorno de la estación.
- Incluir el formato de coordenadas UTC estándar en los registros para evitar incertidumbre sobre el momento exacto de la medición.
- No realizar revisiones exhaustivas de estaciones que presentan fallas estructurales o de conectividad constantes, sino enfocar los recursos en validar y asegurar la disponibilidad de acceso y el correcto estado de los dispositivos de detección de gases en aquellas estaciones que sí aportan datos consistentes.

Bibliografía

[Almalki, 2025] Almalki, F. A. (2025). Developing an intelligent framework with blockchain capabilities for environmental monitoring using a cubesat. The Computer Journal, page bxaf017.

[Asociación Española de Teledetección, 2025] Asociación Española de Teledetección (2025). Revisando el concepto de resolución en teledetección. Accedido: julio 4, 2025.

[Bellavia et al., 2015] Bellavia, L., Kim-Shapiro, D., and King, S. (2015). Detecting and monitoring no, sno and nitrite in vivo. Future Science OA, 1:1–9.

[Breeze Technologies, 2021] Breeze Technologies (2021). Air pollution: How to convert between mg/m^3, µg/m^3, ppm, ppb. Breeze Technologies Blog.

[CEOS Database, 2025a] CEOS Database (2025a). Sentinel-1 c satellite mission summary. `https://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=577`. Accedido: 06-08-2025.

[CEOS Database, 2025b] CEOS Database (2025b). Sentinel-2 a satellite mission summary. `https://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=552`. Accedido: 06-08-2025.

[Chuvieco, 2010] Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel, Barcelona, 3 edition.

[Climate and Clean Air Coalition (CCAC), sf] Climate and Clean Air Coalition (CCAC) (s.f.). Nitrogen oxides (nox). Menciona que las fuentes antropogénicas pueden contribuir con más del 30-50

[Commission for Environmental Cooperation (CEC), sf] Commission for Environmental Cooperation (CEC) (s.f.). Fuentes y vías de contaminación marina en américa del norte. Identifica el transporte y los océanos como fuentes relevantes. Consultado el 25 de mayo de 2024.

[Cooper et al., 2020] Cooper, M. J., Martin, R. V., McLinden, C. A., and Brook, J. R. (2020). Inferring ground-level nitrogen dioxide concentrations at fine spatial resolution applied to the TROPOMI satellite instrument. Environmental Research Letters, 15(10):104013.

[Copernicus, 2025] Copernicus (2025). S2 mission - sentiwiki. `https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission`. Accedido: 06-08-2025.

[Copernicus Programme, 2025] Copernicus Programme (2025). The sentinel missions. `https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions`. Accedido: 06-08-2025.

[Dall'Osto et al., 2009] Dall'Osto, M., Harrison, R. M., Coe, H., Williams, P. I., and Allan, J. D. (2009). Real time chemical characterization of local and regional nitrate aerosols. Atmospheric Chemistry and Physics, 9:3709–3720.

[Diario Digital Colombiano, 2015] Diario Digital Colombiano (2015). China: Alarma social al caer lluvia con espuma blanca sobre tianjin.

[eoPortal, 2025a] eoPortal (2025a). Copernicus: Sentinel-1. https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-1. Accedido: 06-08-2025.

[eoPortal, 2025b] eoPortal (2025b). Copernicus: Sentinel-3. https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-3. Accedido: 06-08-2025.

[eoPortal, 2025c] eoPortal (2025c). Pace: Plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem. https://www.eoportal.org/satellite-missions/pace-mission. Accedido: 24-11-2025.

[eoPortal, 2025d] eoPortal (2025d). Surface water and ocean topography (swot) mission. https://www.eoportal.org/satellite-missions/swot. Accedido: 24-11-2025.

[EPA, nd] EPA (n.d.). Acerca de los contaminantes del aire en interiores.

[European Environment Agency (EEA), 2023] European Environment Agency (EEA) (2023). Nitrogen dioxide air pollution. Señala que en algunas ciudades el tráfico puede ser responsable de más del 75

[European Space Agency, 2025a] European Space Agency (2025a). Copernicus: The european earth observation programme. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus. Accedido: 06-08-2025.

[European Space Agency, 2025b] European Space Agency (2025b). Historia de la observación terrestre. Accedido: julio 4, 2025.

[European Space Agency, 2025c] European Space Agency (2025c). Sentinel-4. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-4. Accedido: 06-08-2025.

[European Space Agency, 2025d] European Space Agency (2025d). Sentinel-5p. http://esoc.esa.int/content/sentinel-5p. Accedido: 06-08-2025.

[European Union, 2025a] European Union (2025a). Copernicus history overview. https://www.copernicus.eu/en/copernicus-documents-library/copernicus-history-overview. Accedido: 06-08-2025.

[European Union, 2025b] European Union (2025b). El programa copernicus de la unión europea: Una investigación detallada de sus misiones satelitales sentinel. Technical report, Copernicus Programme. Informe técnico interno.

[Generalitat Valenciana, sf] Generalitat Valenciana (s.f.). La contaminación atmosférica por dióxido de nitrógeno. Indica que la vegetación y la actividad microbiana del suelo constituyen un 14

[Hargreaves et al., 2019] Hargreaves, R. J., Gordon, I. E., Rothman, L. S., Tashkun, S. A., Perevalov, V. I., Lukashevskaya, A. A., Yurchenko, S. N., Tennyson, J., and Müller, H. S. (2019). Spectroscopic line parameters of NO, NO_2, and N_2O for the HITEMP database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 232:35–53.

[Hersbach et al., 2020] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The era5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730):1999–2049.

[Huneeus et al., 2022] Huneeus, N., Álamos, N., Opazo, M., Osses, M., Puja, S., Pantoja, N., Denier van der Gon, H., Schueftan, A., Reyes, R., and Calvo, R. (2022). High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining and residential activities in Chile. Earth System Science Data, 14:361–379.

[iSE-Academy, 2025] iSE-Academy (2025). Teledetección ¿qué es? Accedido: julio 4, 2025.

[Karen, 2015] Karen, P. (2015). Oxidation state, a long-standing issue! Angewandte Chemie International Edition, 54(16):4716–4726.

[Lee, 2025] Lee, S. (2025). Ultimate guide to big data in remote sensing & gis. Accedido: julio 4, 2025.

[Li et al., 2023] Li, Z.-L., Wu, H., Duan, S.-B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng, P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, M., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, B.-H., Yan, G., and Zhou, C. (2023). Satellite remote sensing of global land surface temperature: Definition, methods, products, and applications. Reviews of Geophysics, 61(1):e2022RG000777.

[Liu et al., 2016] Liu, F., Beirle, S., Zhang, Q., Dörner, S., He, K., and Wagner, T. (2016). NO_x lifetimes and emissions of cities and power plants in polluted background estimated by satellite observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 16:5283–5298.

[Liu et al., 2023] Liu, S., Cheng, S., Ma, J., Xu, X., Lv, J., Jin, J., Guo, J., Yu, D., and Dai, X. (2023). MAX-DOAS measurements of tropospheric NO_2 and HCHO vertical profiles at the Longfengshan Regional Background Station in Northeastern China. Sensors, 23(6):3269.

[Mateluna Cuadra, 2025] Mateluna Cuadra, J. (2025). Usm busca nuevo triunfo internacional con innovador nanosatélite. Consultado el 24 de noviembre de 2025.

[Miller, 2013] Miller, S. e. a. (2013). Illuminating the capabilities of the suomi npp viirs day/night band.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2024a] Ministerio del Medio Ambiente (2024a). Informe técnico exhaustivo: Arquitectura, metrología y gobernanza del sistema de información nacional de calidad del aire (sinca) en chile. Informe técnico, Gobierno de Chile. Accedido: 24-11-2025.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2024b] Ministerio del Medio Ambiente (2024b). Informe técnico exhaustivo: Arquitectura, metrología y gobernanza del sistema de información nacional de calidad del aire (sinca) en chile. Informe técnico, Gobierno de Chile. Accedido: 24-11-2025.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2025] Ministerio del Medio Ambiente (2025). Sistema de información nacional de calidad del aire (SINCA). Accedido: 28-11-2025.

[Molina Matta and Cañas Ortega, 2020] Molina Matta, F. and Cañas Ortega, E. (2020). Régimen jurídico de las estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos: Regulación, responsabilidades y órganos competentes. Revista de Derecho Ambiental, (14):43–70.

[Morillas López, 2024] Morillas López, C. (2024). Análisis de datos satelitales de concentración de NO_2 en ambientes urbanos. Aplicación a ciudades de España. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Bajo la dirección de Dra. Sara Martínez Delgado.

[NASA, 2025a] NASA (2025a). El programa de observación terrestre de la nasa (eos/eso): Una investigación detallada de sus misiones de monitoreo terrestre. Technical report, National Aeronautics and Space Administration. Informe técnico interno.

[NASA, 2025b] NASA (2025b). How it works — icesat-2. https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/how-it-works. Accedido: 24-11-2025.

[NASA, 2025c] NASA (2025c). Landsat 9 mission brochure. https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2020-11/Landsat%209%20brochure%20final%20508%20compliant.pdf. Accedido: 24-11-2025.

[NASA, 2025d] NASA (2025d). Technical specs — icesat-2. https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/specs. Accedido: 24-11-2025.

[NASA, 2025e] NASA (2025e). Tempo mission. https://tempo.si.edu/instrument.html. Accedido: 24-11-2025.

[NASA Applied Sciences, 2023] NASA Applied Sciences (2023). Fundamentos de la teledetección (percepción remota). Accedido: julio 4, 2025.

[NASA Earthdata, 2025a] NASA Earthdata (2025a). Ka-band radar interferometer. https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/karin. Accedido: 24-11-2025.

[NASA Earthdata, 2025b] NASA Earthdata (2025b). Swot science data products - user handbook. https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2024-06/D-109532_SWOT_UserHandbook_20240502.pdf. Accedido: 24-11-2025.

[NASA Earthdata, 2025c] NASA Earthdata (2025c). Tropomi instrument. https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/tropomi. Accedido: 06-08-2025.

[NASA Earthdata, 2025d] NASA Earthdata (2025d). Viirs - visible infrared imaging radiometer suite. https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs. Accedido: 24-11-2025.

[NASA Earthdata, 2025e] NASA Earthdata (2025e). Viirs spectral bands. https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs/spectral-bands. Accedido: 24-11-2025.

[NASA EOS, 2025a] NASA EOS (2025a). Icesat-2 mission brochure. https://eospso.nasa.gov/sites/default/files/publications/ICESat-2_missionBrochure_508.pdf. Accedido: 24-11-2025.

[NASA EOS, 2025b] NASA EOS (2025b). Suomi national polar-orbiting partnership (suomi npp). https://eospso.nasa.gov/missions/suomi-national-polar-orbiting-partnership. Accedido: 24-11-2025.

[NASA JPL, 2025] NASA JPL (2025). Sentinel-6 michael freilich satellite. https://www.jpl.nasa.gov/missions/sentinel-6/. Accedido: 06-08-2025.

[NASA Landsat Science, 2025a] NASA Landsat Science (2025a). Landsat 9 instruments. https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/. Accedido: 24-11-2025.

[NASA Landsat Science, 2025b] NASA Landsat Science (2025b). Landsat 9 spectral specifications. https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/landsat-9-spectral-specifications/. Accedido: 24-11-2025.

[NASA PACE, 2025a] NASA PACE (2025a). Ocean color instrument (oci). https://pace.oceansciences.org/oci.htm. Accedido: 24-11-2025.

[NASA PACE, 2025b] NASA PACE (2025b). Pace mission. https://pace.oceansciences.org/mission.htm. Accedido: 24-11-2025.

[NASA SWOT, 2025a] NASA SWOT (2025a). Swot mission overview. https://swot.jpl.nasa.gov/mission/overview/. Accedido: 24-11-2025.

[NASA SWOT, 2025b] NASA SWOT (2025b). Swot river products. https://swot.jpl.nasa.gov/resources/136/swot-river-products/. Accedido: 24-11-2025.

[NASA Technical Reports Server, 2025] NASA Technical Reports Server (2025). Evolution of the earth observing system (eos) data and information system (eosdis). https://ntrs.nasa.gov/citations/20090003203. Accedido: 24-11-2025.

[National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2018). Thriving on our changing planet: A decadal strategy for earth observation from space.

[National Snow and Ice Data Center, 2025] National Snow and Ice Data Center (2025). Icesat-2 data. https://nsidc.org/data/icesat-2. Accedido: 24-11-2025.

[Natural Resources Canada, 2015] Natural Resources Canada (2015). Satellite characteristics: Orbits and swaths. https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/satellite-elevation-air-photos/satellite-characteristics-orbits-swaths. Accedido: 2025-12-04.

[Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE), 2022] Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE) (2022). 2.3 otros gases contaminantes. Consultado el 25 de mayo de 2024. Disponible en: https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/sostenibilidad-y-medio-ambiente/otle/fichas-tematicas/2.3-otros-gases-contaminantes.

[Parra, 2017] Parra, R. (2017). Efecto fin de semana en la calidad del aire de la ciudad de cuenca, ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, 9(15):104–111.

[Pathak et al., 2009] Pathak, R. K., Wu, W. S., and Wang, T. (2009). Summertime $PM_{2,5}$ ionic species in four major cities of China: nitrate formation in an ammonia-deficient atmosphere. Atmospheric Chemistry and Physics, 9:1711–1722.

[Petetin et al., 2020] Petetin, H., Albert Soret Miravet and, C. P. G.-P., Gonzalez, C. G., and Serradell, K. (2020). 19 space based inference of surface no2 concentrations in megacities with tropomi - earth science. https://youtu.be/nqejnFQypNk. Video de YouTube.

[Petetin et al., 2022] Petetin, H., Guevara, M., Compernolle, S., Bowdalo, D., Bretonnière, P.-A., Enciso, S., Jorba, O., Lopez, F., Soret, A., and Pérez García-Pando, C. (2022). Potential of TROPOMI for understanding spatio-temporal variations in surface NO_2 and their dependencies upon land use over the Iberian Peninsula. EGUsphere. Preprint.

[PubChem, 2005] PubChem (2005). Nitrogen dioxide. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nitrogen-Dioxide#section=Molecular-Formula.

[Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR), sf] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) (s.f.). Ficha de la sustancia: Óxidos de nitrógeno (nox). Describe fuentes naturales como volcanes y tormentas eléctricas. Consultado el 25 de mayo de 2024. Disponible en: https://prtr-es.es/NOX-oxidos-de-nitrogeno,15605,1,2007.html.

[Savenets, 2021] Savenets, M. (2021). Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. Időjárás, 125(2):271–290.

[Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2018] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2018). Informe de la situación del medio ambiente en méxico. Edición 2018, Compendio de Estadísticas Ambientales. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html.

[Sentinel Online, 2025] Sentinel Online (2025). Sentinel-5 mission. https://sentinels.copernicus.eu/missions/sentinel-5. Accedido: 06-08-2025.

[Seo et al., 2024] Seo, S., Valks, P., Lutz, R., Heue, K.-P., Hedelt, P., Molina García, V., Loyola, D., Lee, H., and Kim, J. (2024). Tropospheric no_2 retrieval algorithm for geostationary satellite instruments: applications to gems. Atmospheric Measurement Techniques, 17(20):6163–6191.

[Solar MEMS, 2024] Solar MEMS (2024). What is New Space? https://solar-mems.com/blog-news/what-is-new-space/. Accedido: 24-11-2025.

[St. Germain, 2025] St. Germain, K. (2025). Nasa's earth system observatory formulation progress. https://ntrs.nasa.gov/citations/20230013083. Accedido: 24-11-2025.

[Suomi NPP Atmosphere Team, 2025] Suomi NPP Atmosphere Team (2025). Viirs basics. https://www.ssec.wisc.edu/suomi_npp/Atmosphere_Team/VIIRS_Basics.html. Accedido: 24-11-2025.

[Superintendencia del Medio Ambiente, 2020] Superintendencia del Medio Ambiente (2020). Resolución exenta n° 126: Aprueba instrucción general para la conexión en línea y reportes de seguimiento de las estaciones de vigilancia de calidad del aire. Publicada en el Diario Oficial el 31-ENE-2020.

[Tan and Piri, 2013] Tan, S. P. and Piri, M. (2013). Modeling the solubility of nitrogen dioxide in water using perturbed-chain statistical associating fluid theory. Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(45):16032–16043.

[Taylor, 2020] Taylor, B. M. (2020). A multi-way correlation coefficient. arXiv:2003.02561 [stat.ME].

[udaix, 2017] udaix (2017). Oxidation reduction process infographic diagram example. Shutterstock. ID de imagen: 695727979 [Ilustración vectorial].

[Universidad Complutense de Madrid, nd] Universidad Complutense de Madrid (n.d.). DescripciÓn de indicadores. Documento sin fecha explícita.

[U.S. Environmental Protection Agency (EPA), sfa] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (s.f.a). Nitrogen oxides (nox), why and how they are controlled. Proporciona el desglose de fuentes antropogénicas en EE.UU. (50

[U.S. Environmental Protection Agency (EPA), sfb] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (s.f.b). Óxidos de nitrógeno (nox), ¿por qué y cómo se controlan? Boletín informativo. Consultado el 25 de mayo de 2024. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/nox_spanish.pdf.

[U.S. Geological Survey, 2025] U.S. Geological Survey (2025). Landsat 9. `https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9`. Accedido: 24-11-2025.

[Wang et al., 2023] Wang, J., Zhang, Y., Zhang, C., Wang, Y., Zhou, J., Whalley, L. K., Slater, E. J., Dyson, J. E., Xu, W., Cheng, P., Han, B., Wang, L., Yu, X., Wang, Y., Woodward-Massey, R., Lin, W., Zhao, W., Zeng, L., Ma, Z., Heard, D. E., and Ye, C. (2023). Validating HONO as an Intermediate Tracer of the External Cycling of Reactive Nitrogen in the Background Atmosphere. Environmental Science & Technology, 57:5474–5484.

[Zhang et al., 2003] Zhang, R., Tie, X., and Bond, D. W. (2003). Impacts of anthropogenic and natural NO_x sources over the U.S. on tropospheric chemistry. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100(4):1509–1514.

Apéndice A

Series temporales P90 %: columna troposférica $[\text{mol/m}^2]$

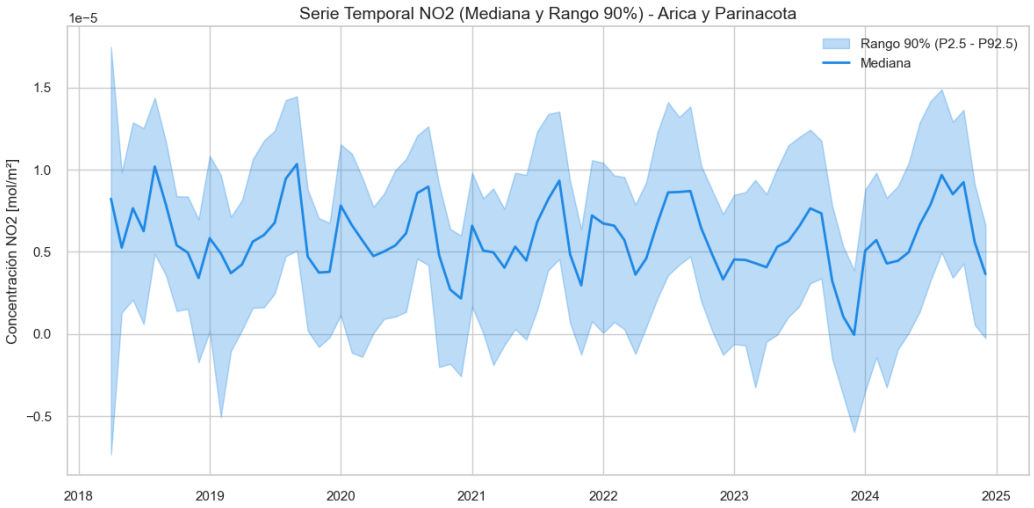


Figura A.1: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Arica y Parinacota.

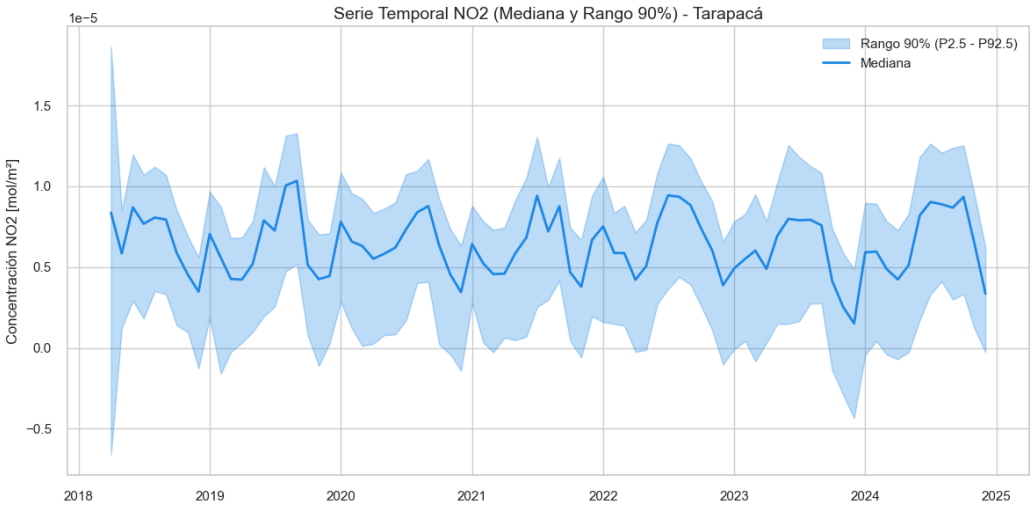


Figura A.2: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Tarapacá.

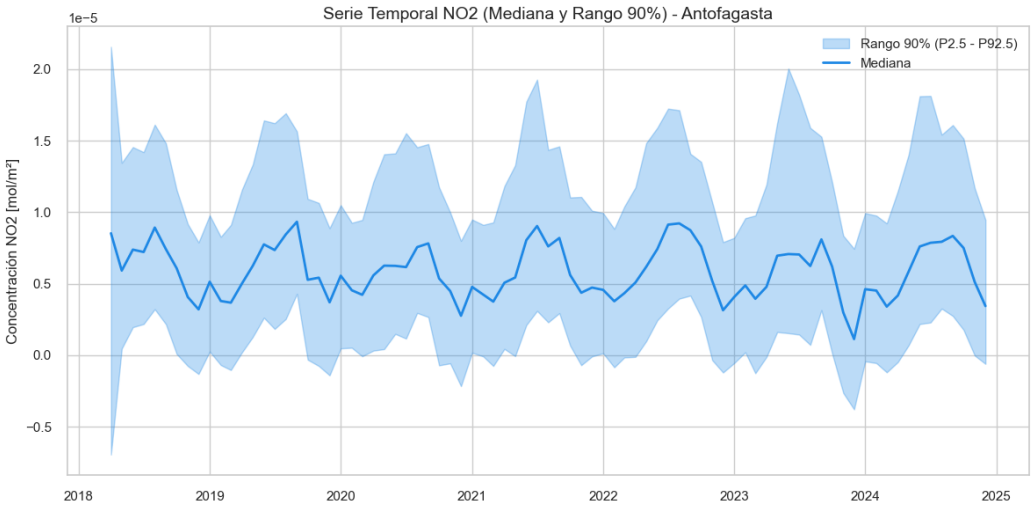


Figura A.3: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Antofagasta.

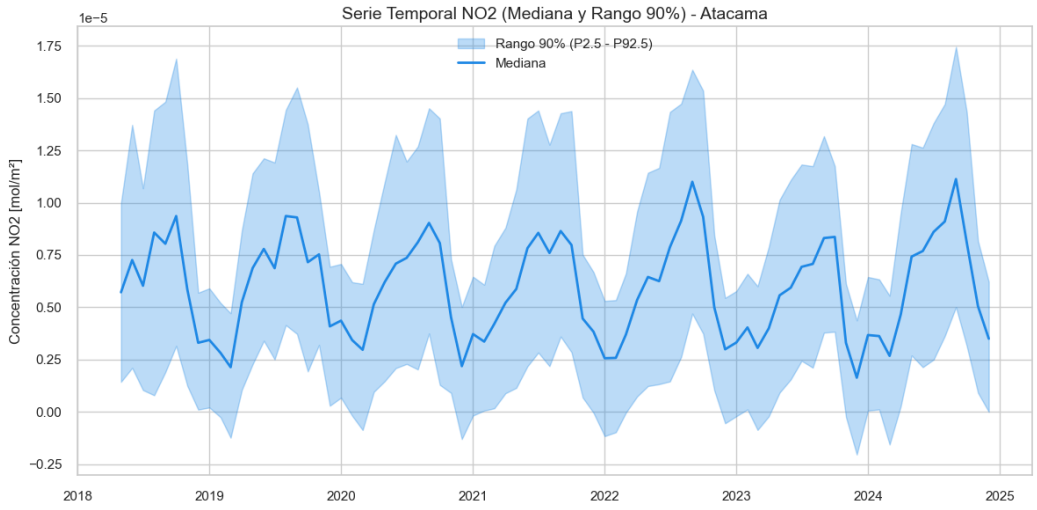


Figura A.4: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Atacama.

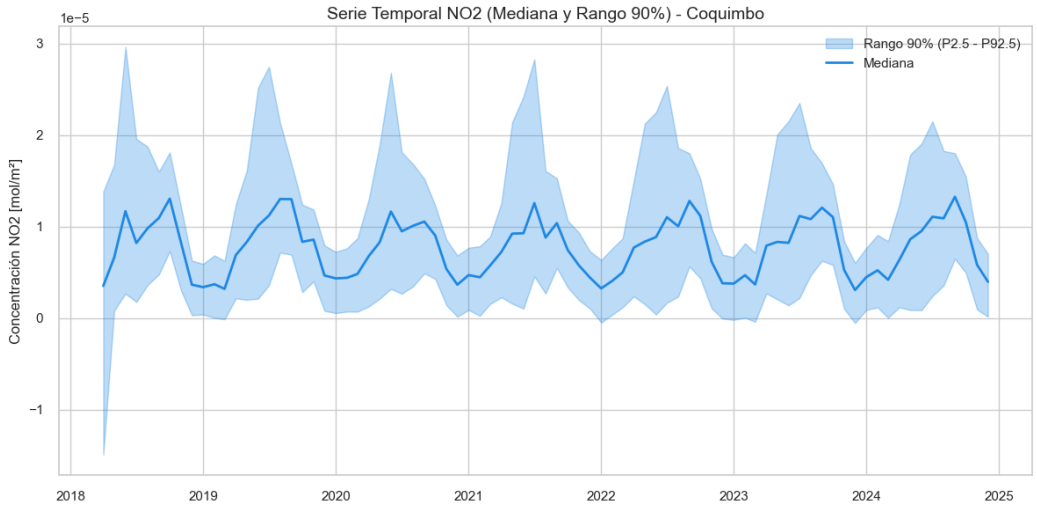


Figura A.5: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Coquimbo.

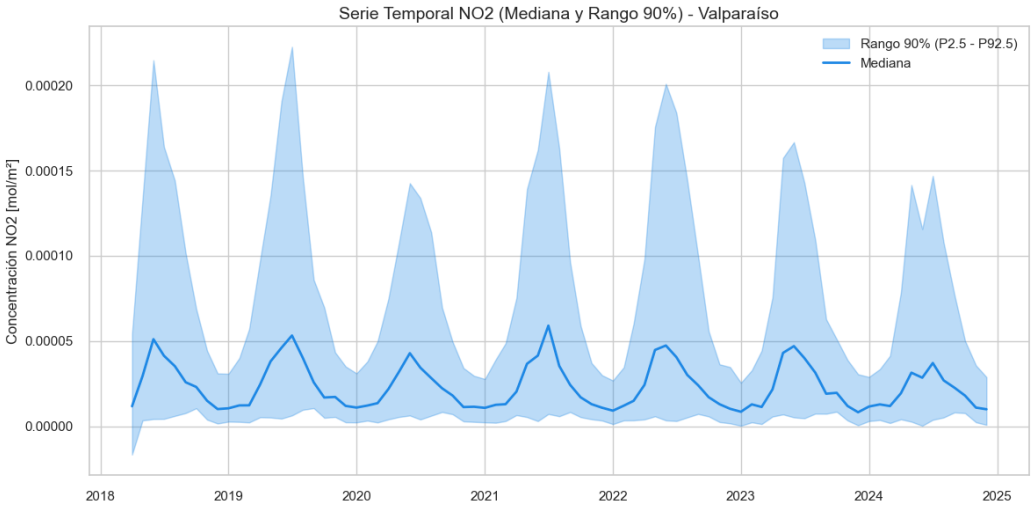


Figura A.6: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Valparaíso.

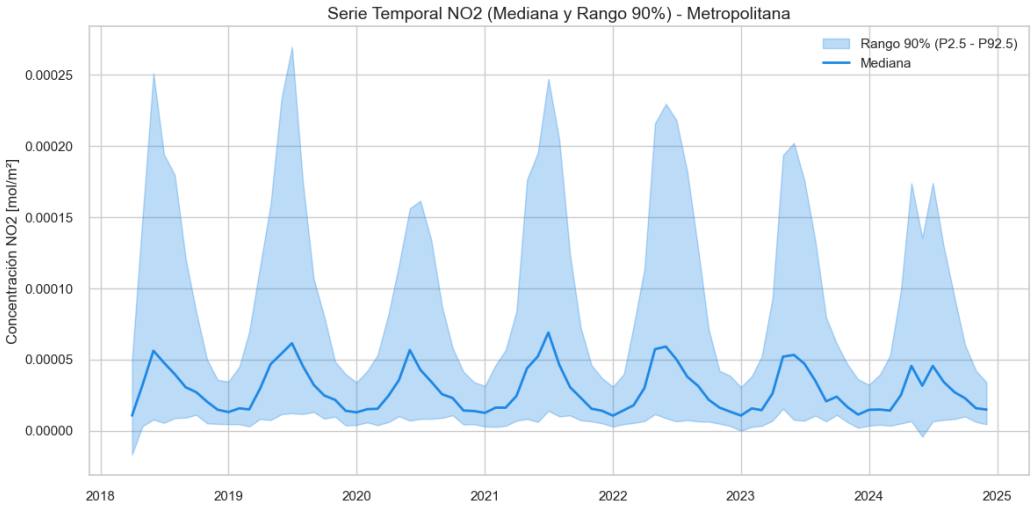


Figura A.7: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región Metropolitana.

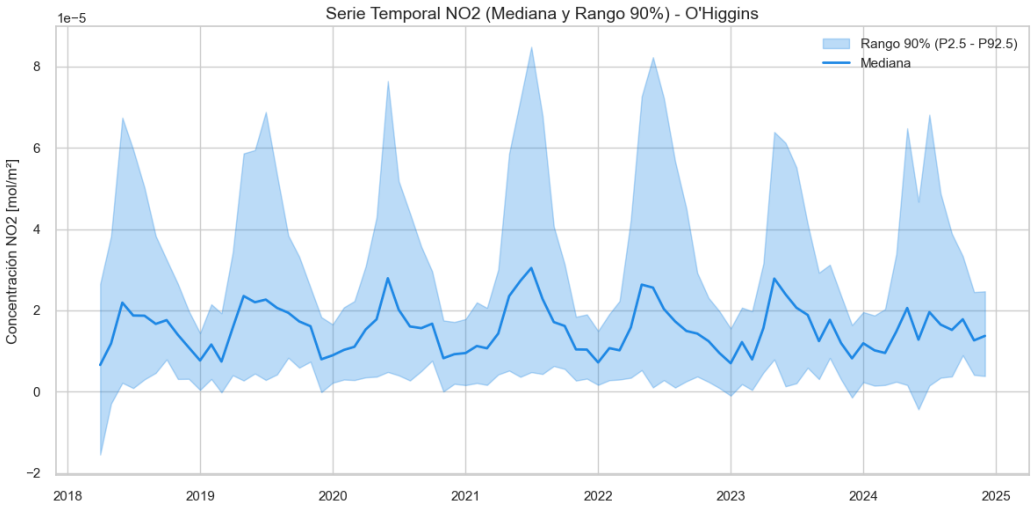


Figura A.8: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de O'Higgins.

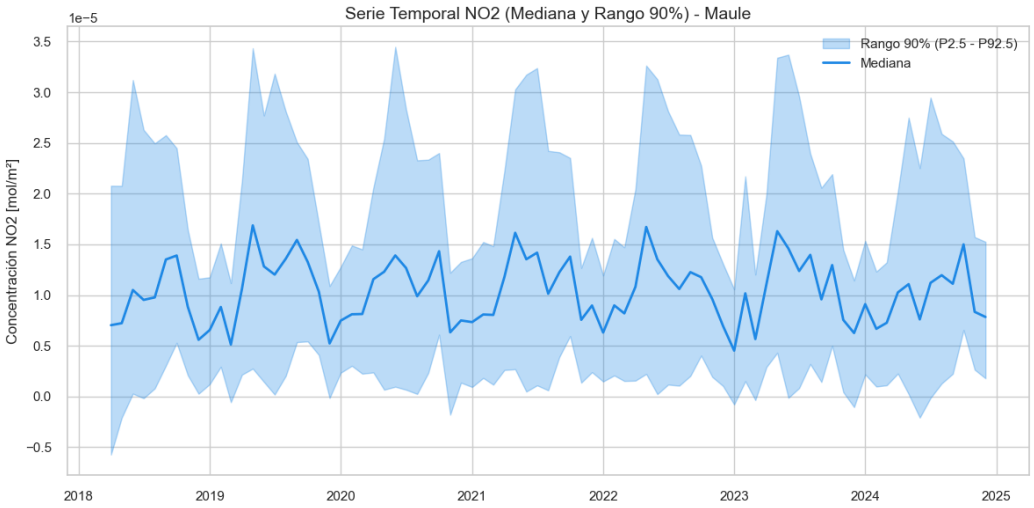


Figura A.9: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región del Maule.

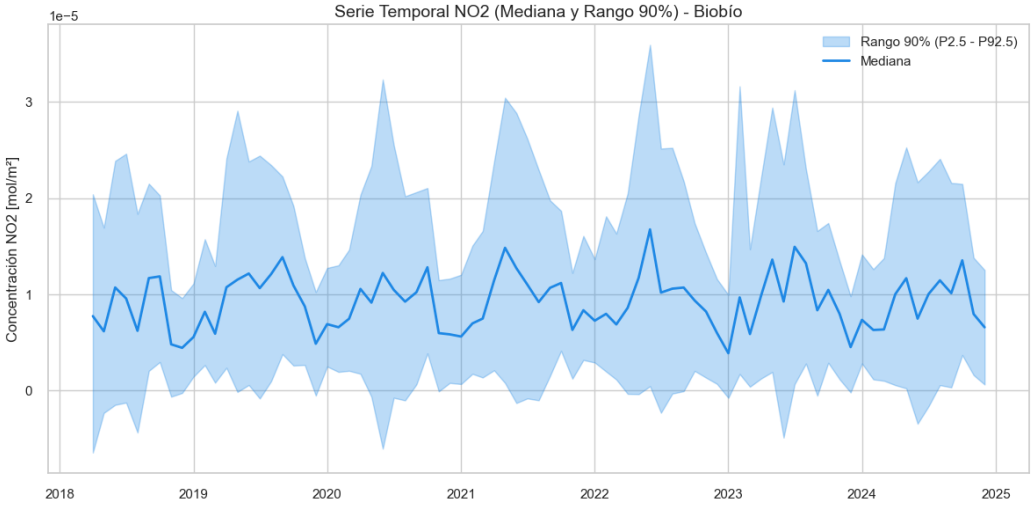


Figura A.10: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región del Biobío.

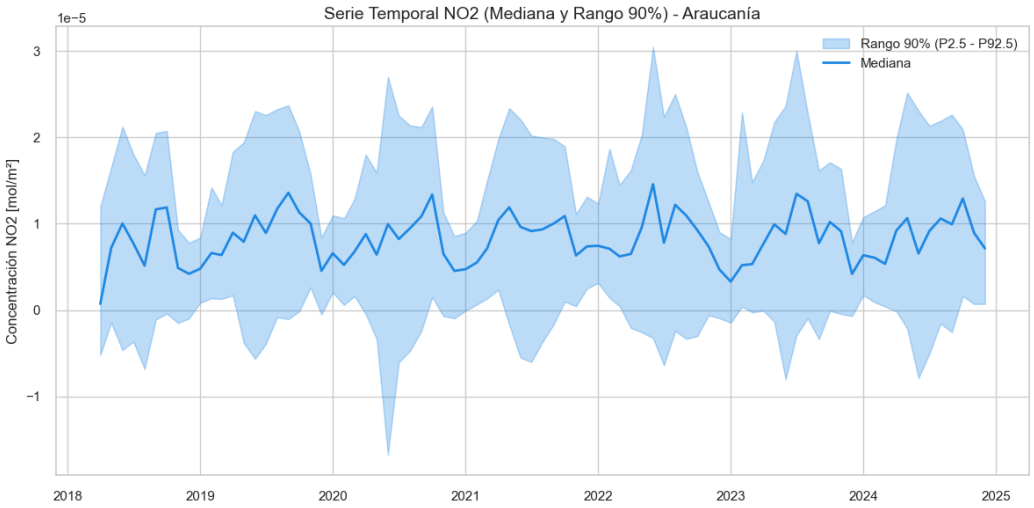


Figura A.11: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de la Araucanía.

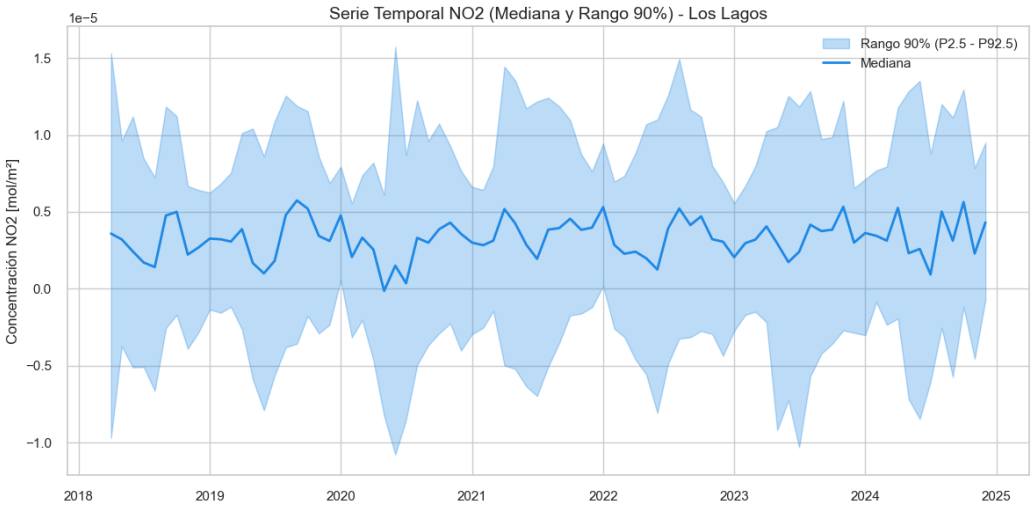


Figura A.12: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Los Lagos.

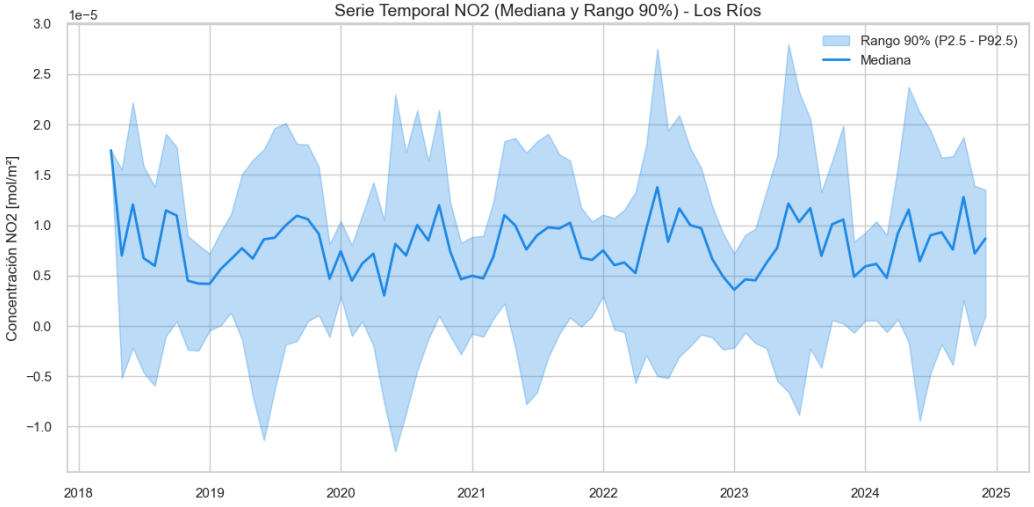


Figura A.13: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Los Ríos.

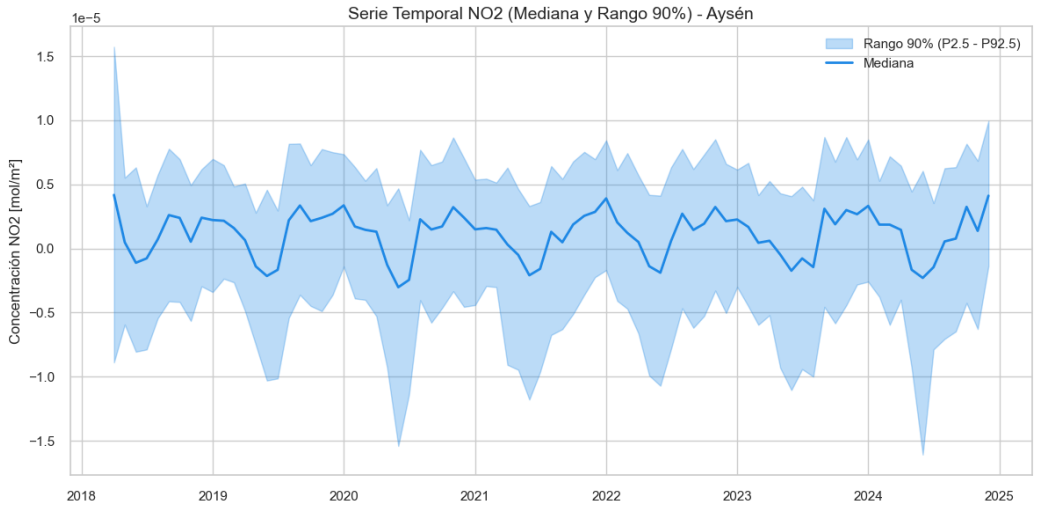


Figura A.14: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Aysén.

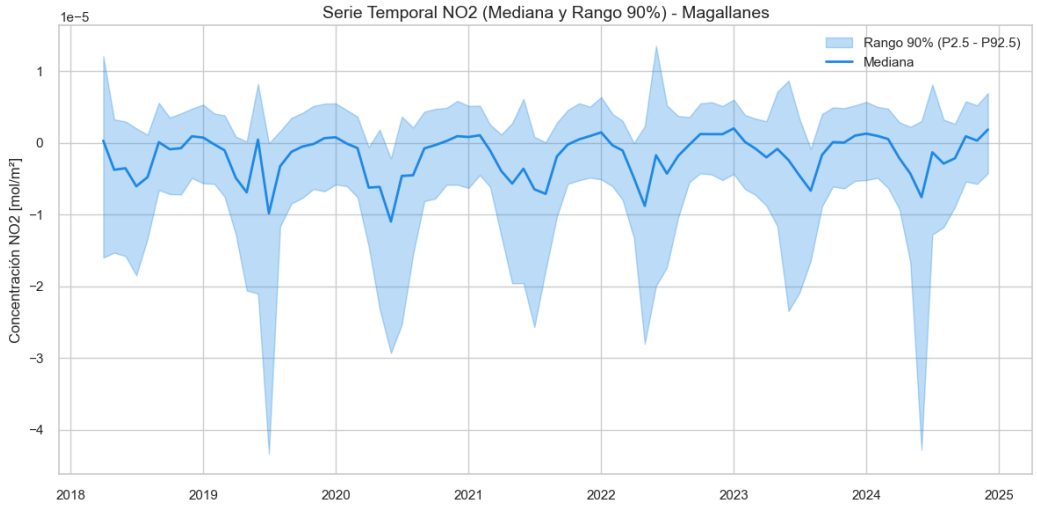


Figura A.15: Serie temporal de la columna troposférica de NO_2 (P90) en la Región de Magallanes.

Apéndice B

Estacionalidad en cantidad de datos

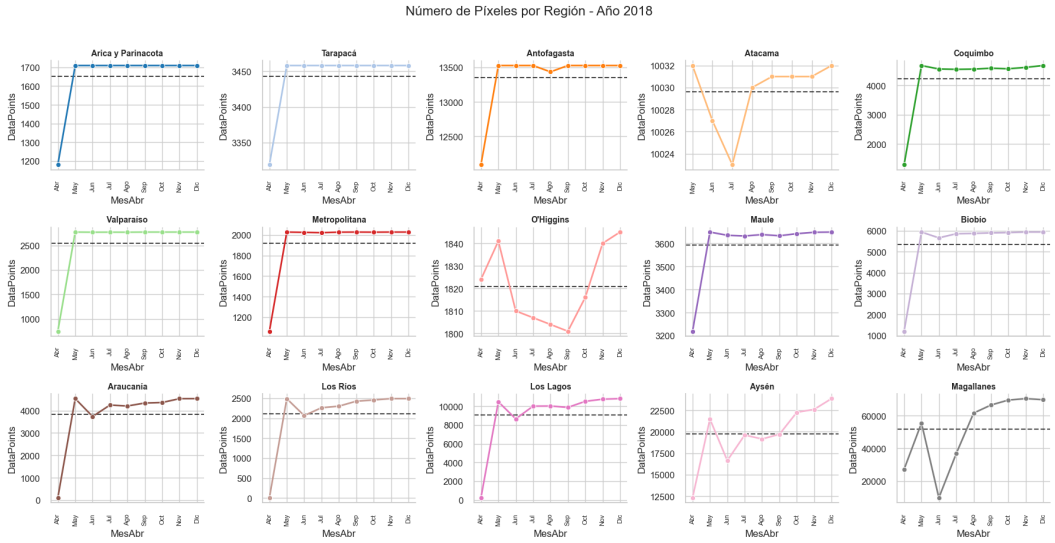


Figura B.1: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2018.

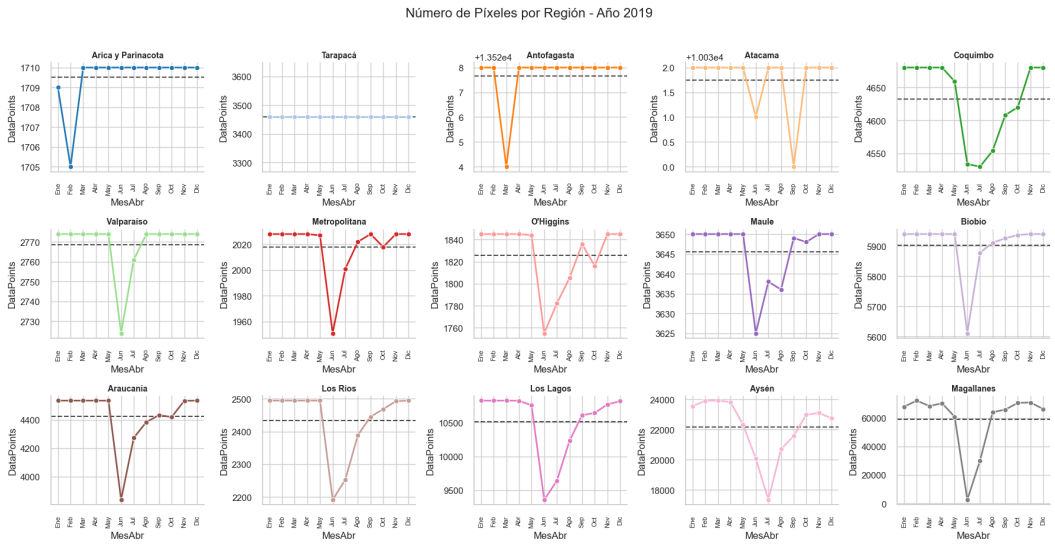


Figura B.2: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2019.

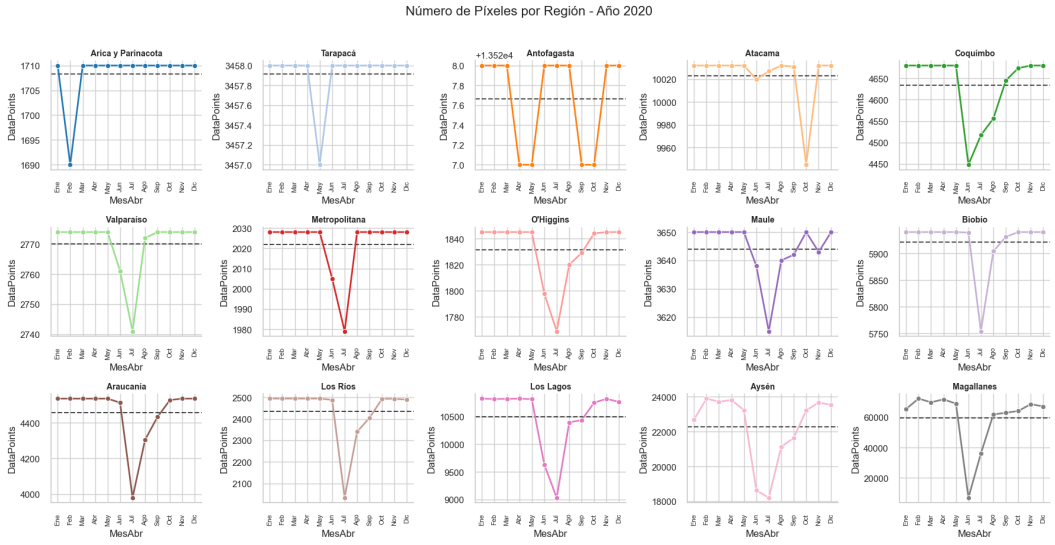


Figura B.3: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2020.

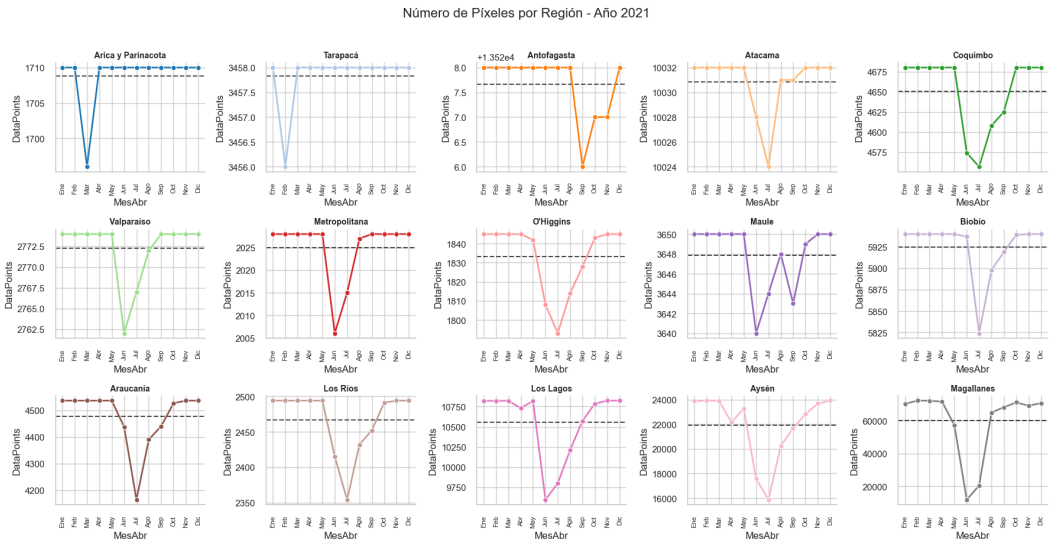


Figura B.4: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2021.

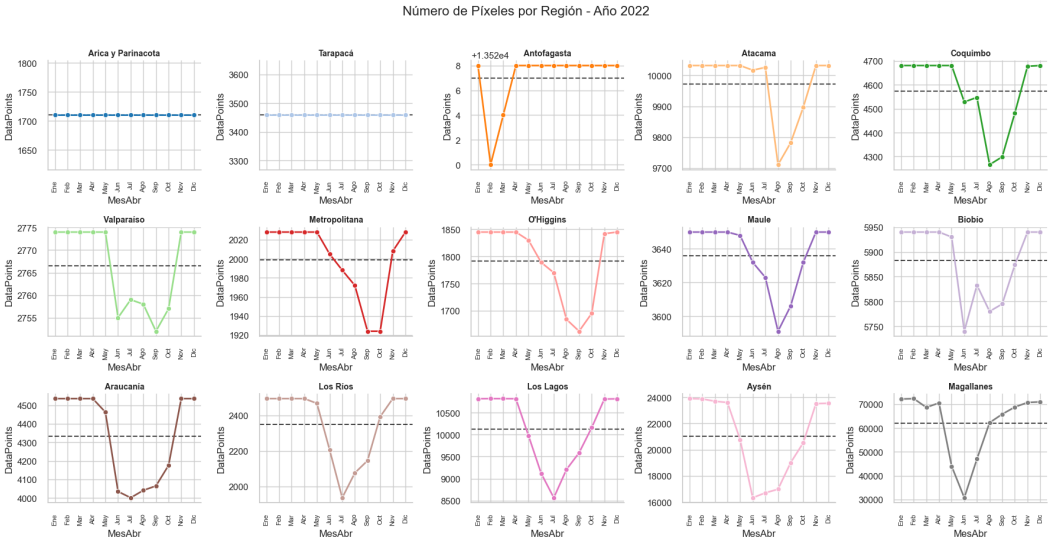


Figura B.5: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2022.

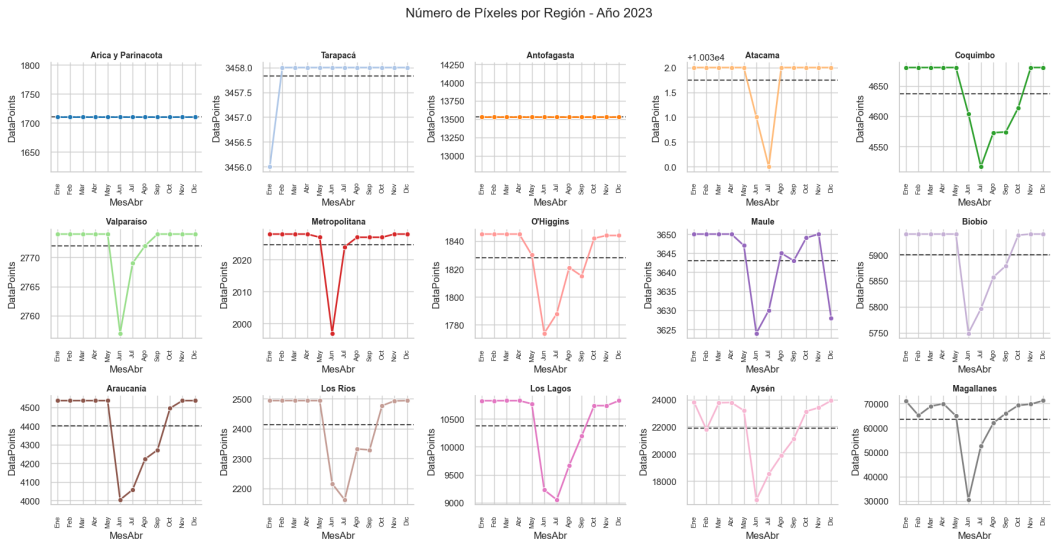


Figura B.6: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2023.

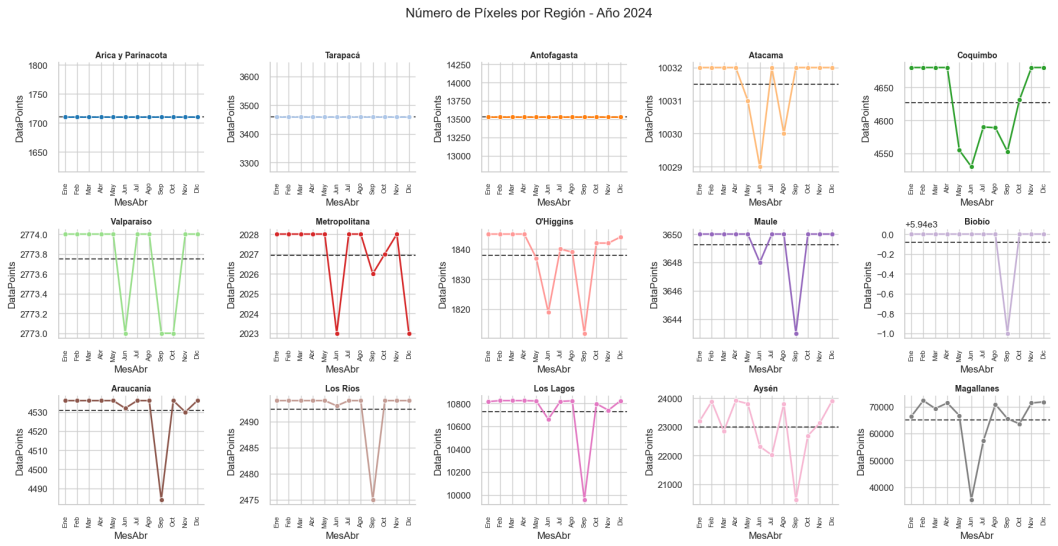


Figura B.7: Distribución estacional de la cantidad de datos (píxeles) de NO_2 correspondientes al año 2024.

Apéndice C

Series temporales para contraste de fuentes

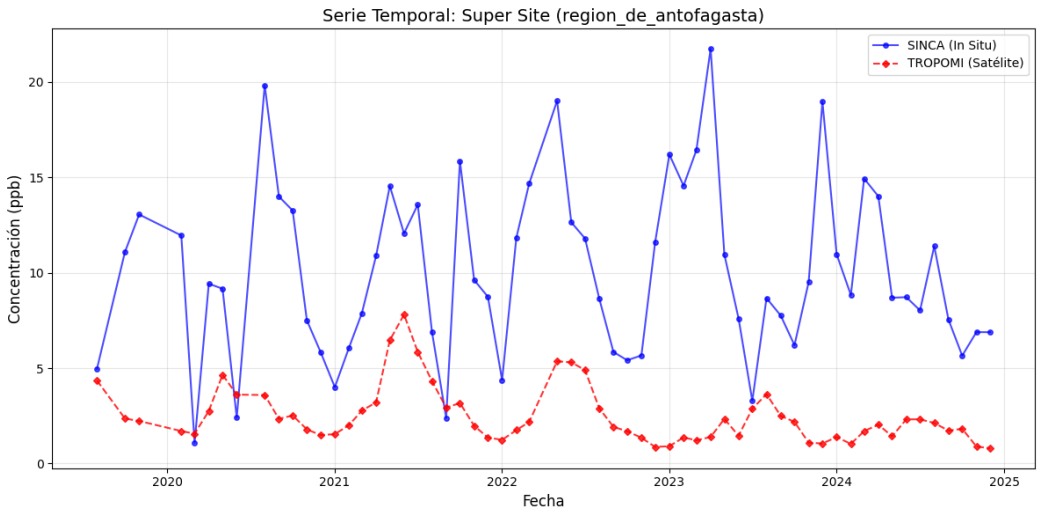


Figura C.1: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Super Site, Región de Antofagasta.

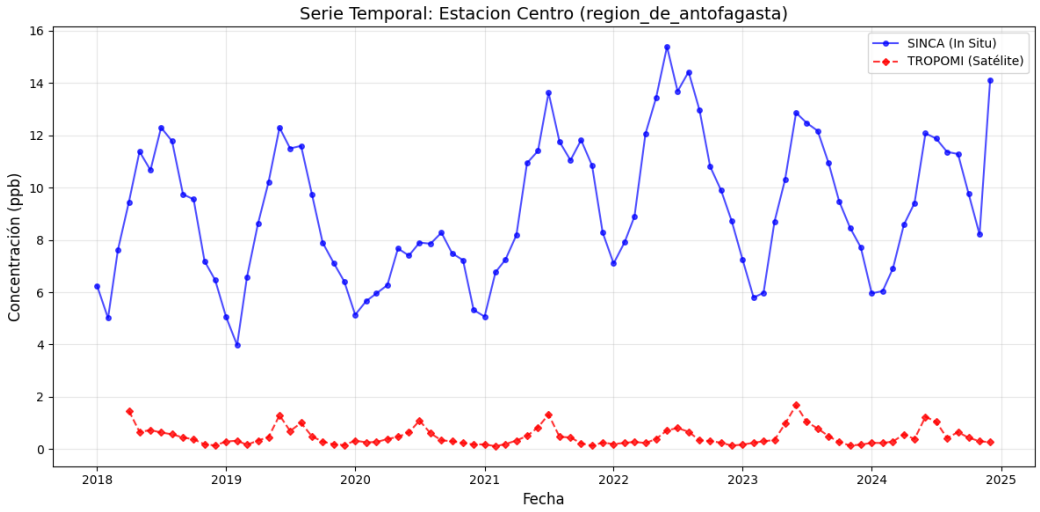


Figura C.2: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Centro, Región de Antofagasta.

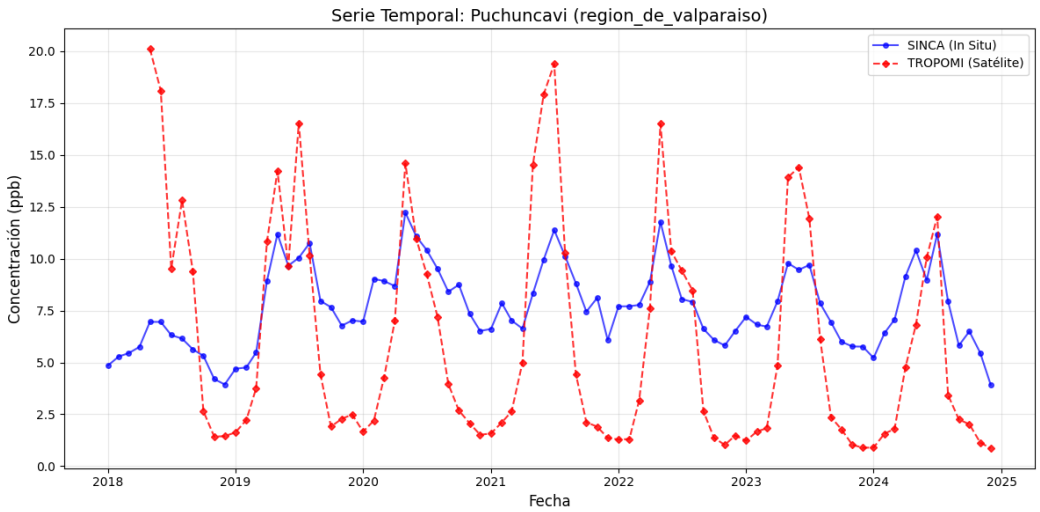


Figura C.3: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Puchuncaví, Región de Valparaíso.

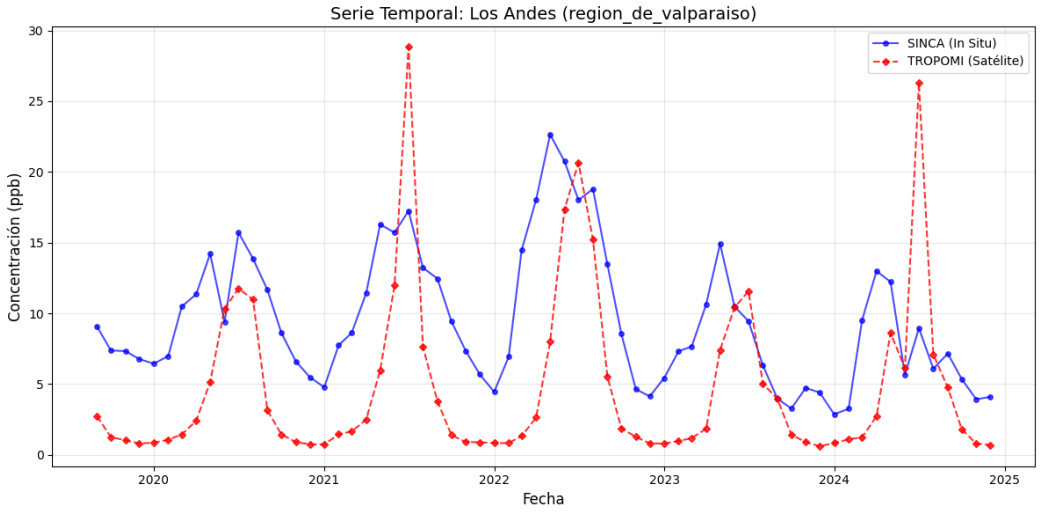


Figura C.4: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Los Andes, Región de Valparaíso.

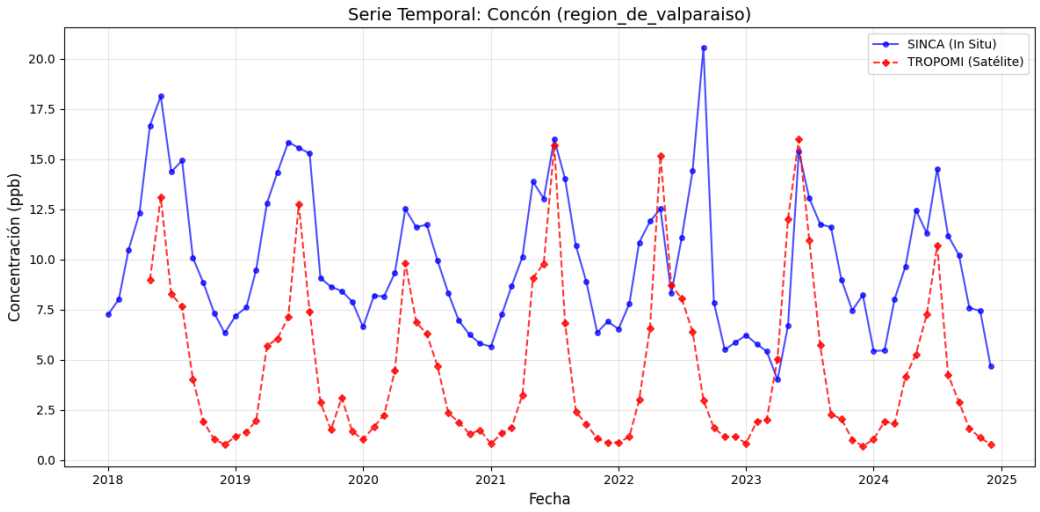


Figura C.5: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Concón, Región de Valparaíso.

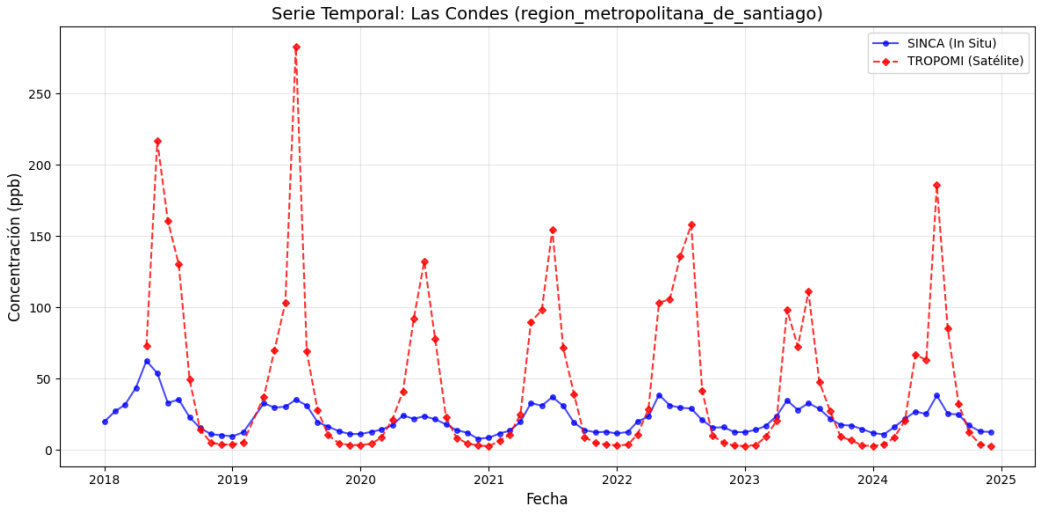


Figura C.6: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Las Condes, Región Metropolitana.

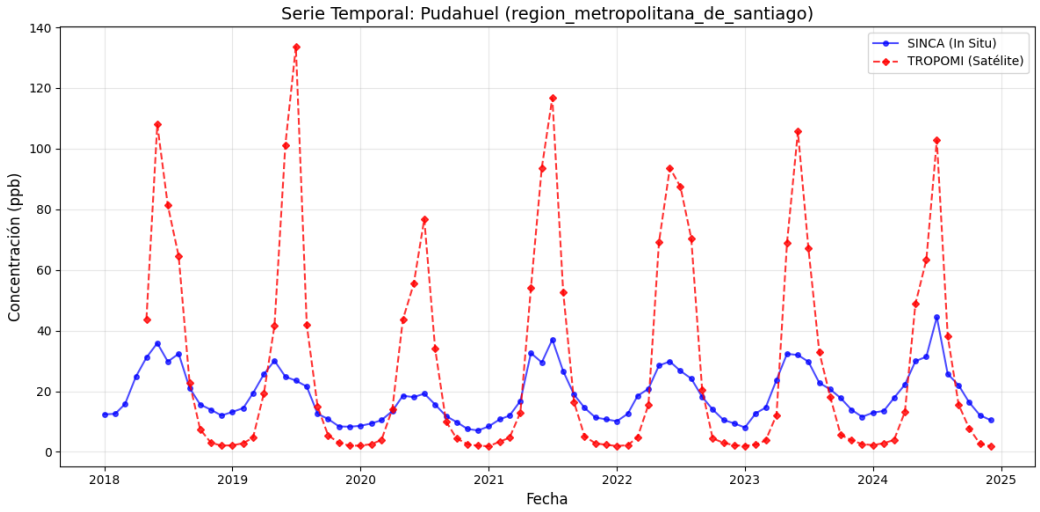


Figura C.7: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Pudahuel, Región Metropolitana.

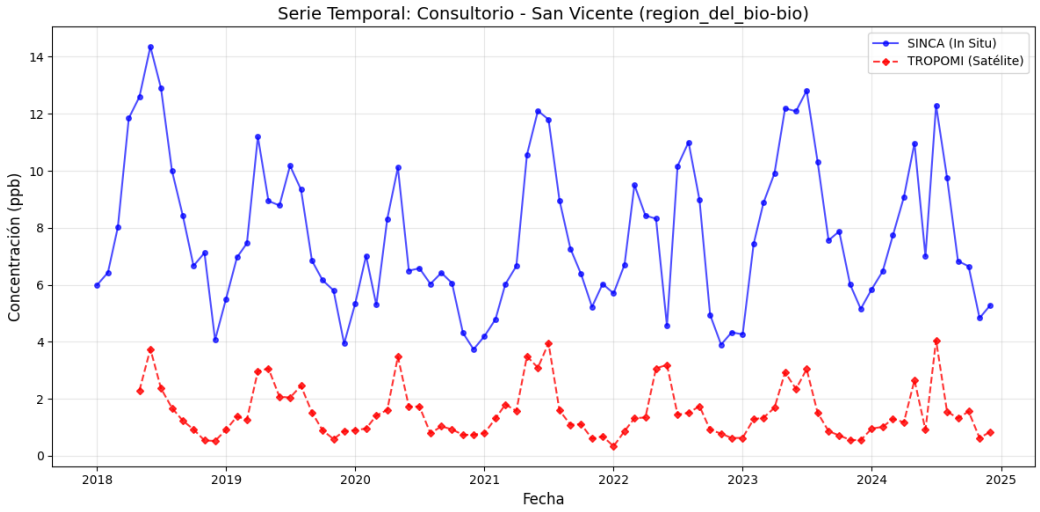


Figura C.8: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Consultorio San Vicente, Región del Biobío.

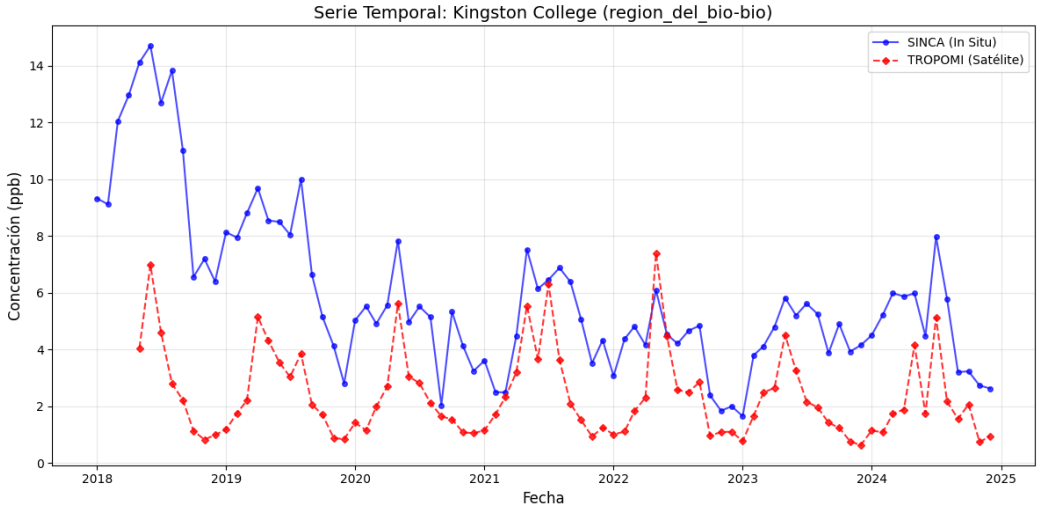


Figura C.9: Serie temporal de NO_2 para contraste de fuentes: Estación Kingston College, Región del Biobío.

Apéndice D

Gráficos de dispersión para contraste de fuentes

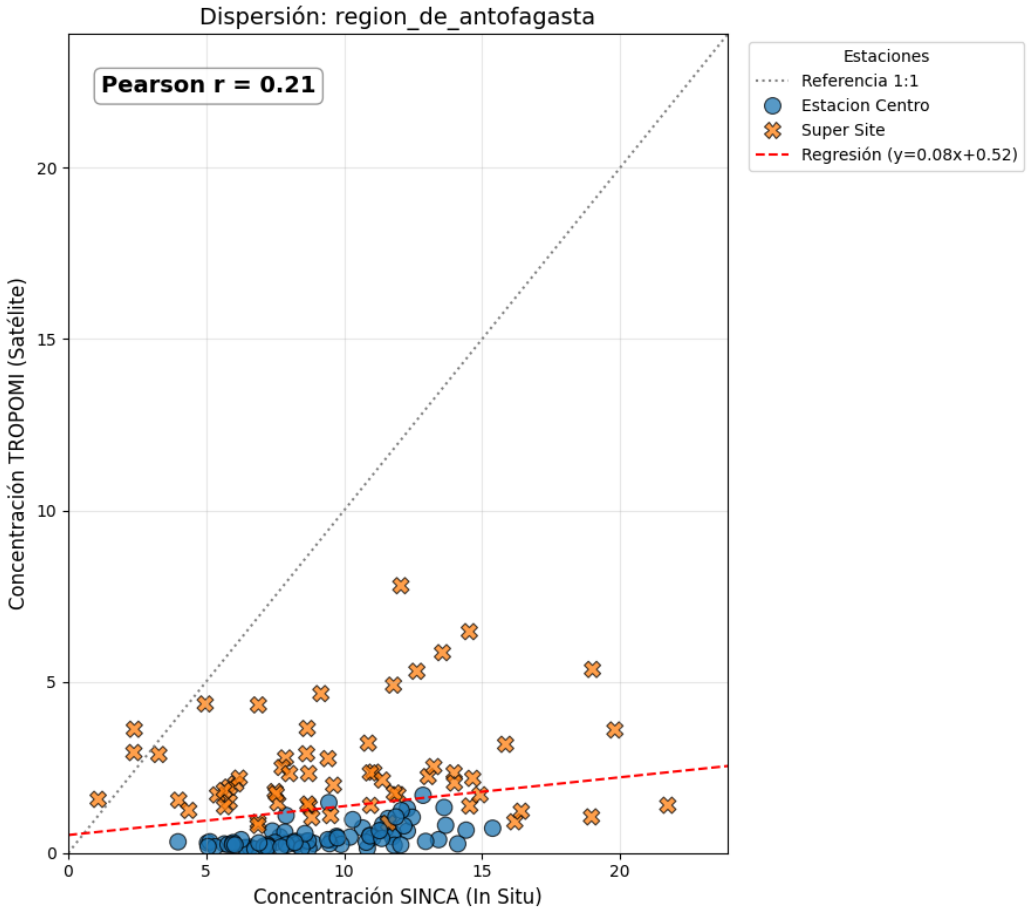


Figura D.1: Gráfico de dispersión de NO_2 para contraste de fuentes en la Región de Antofagasta.

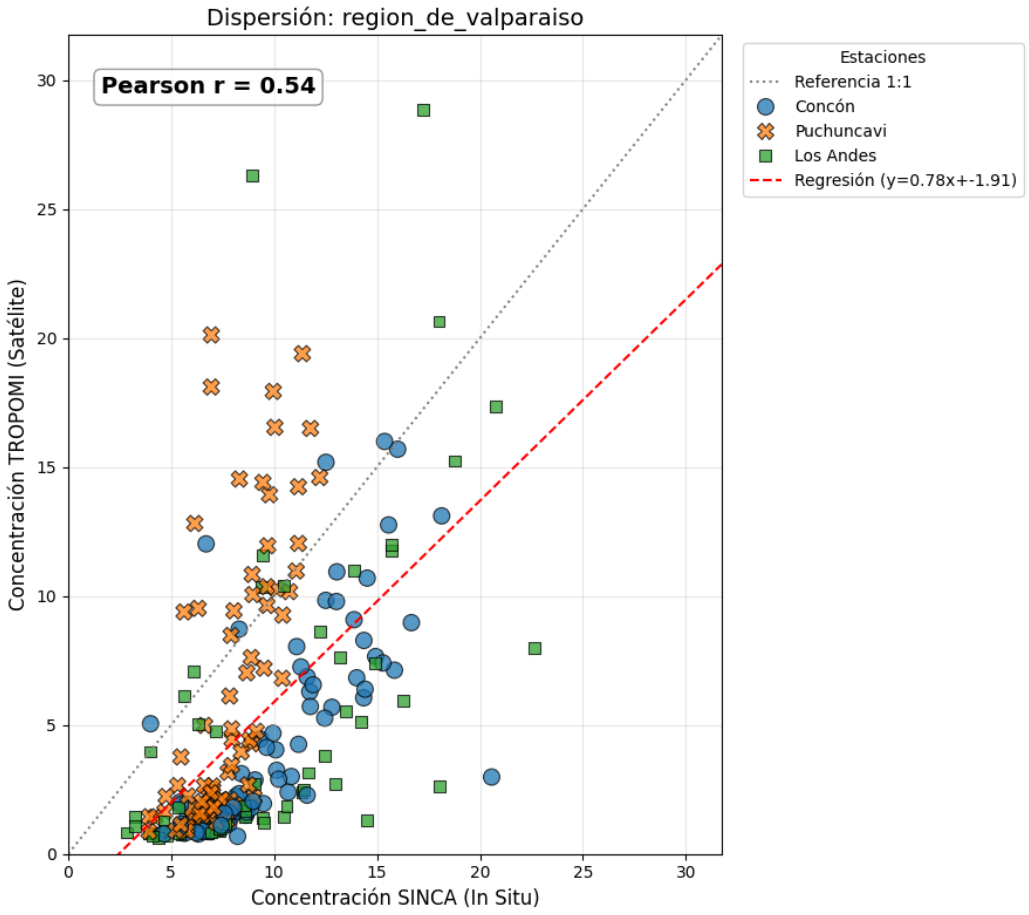


Figura D.2: Gráfico de dispersión de NO_2 para contraste de fuentes en la Región de Valparaíso.

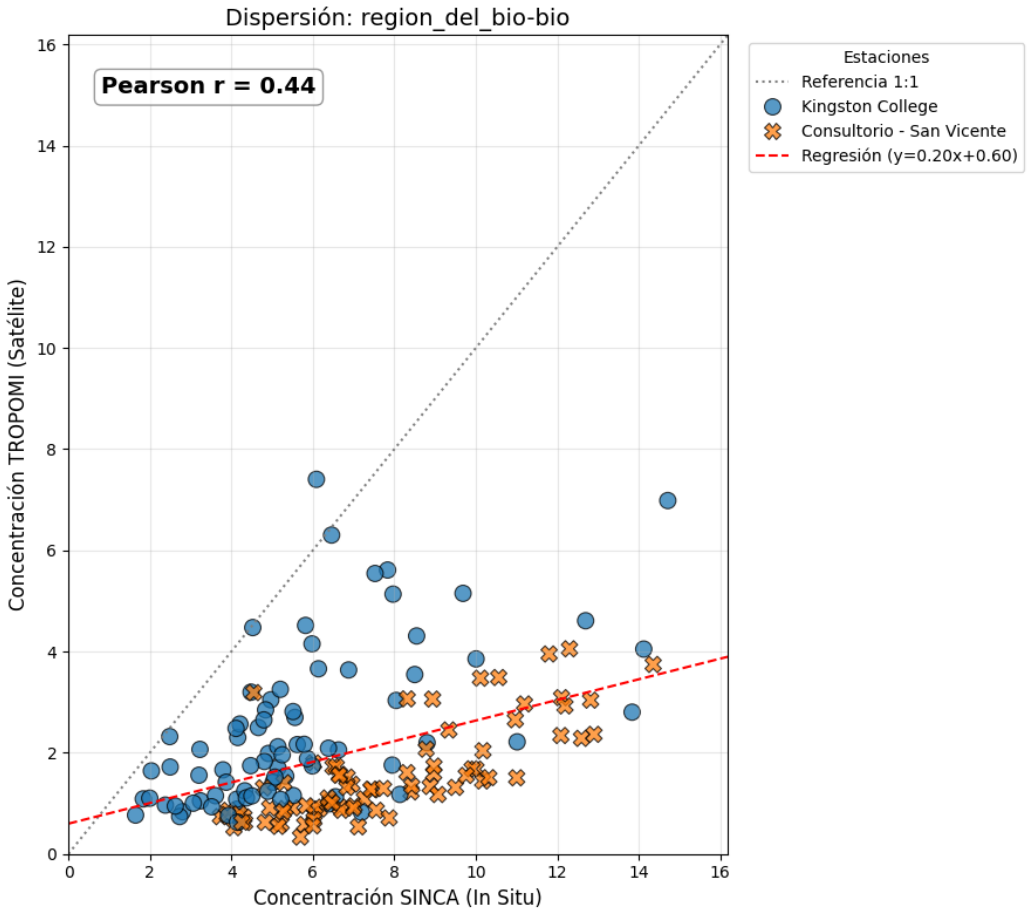


Figura D.3: Gráfico de dispersión de NO_2 para contraste de fuentes en la Región del Biobío.

Apéndice E

Gráficos de caja y bigote para contraste de fuentes

E.1. Región de Antofagasta

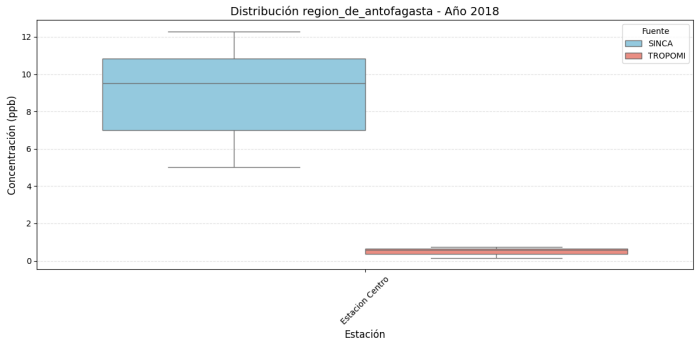


Figura E.1: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2018.

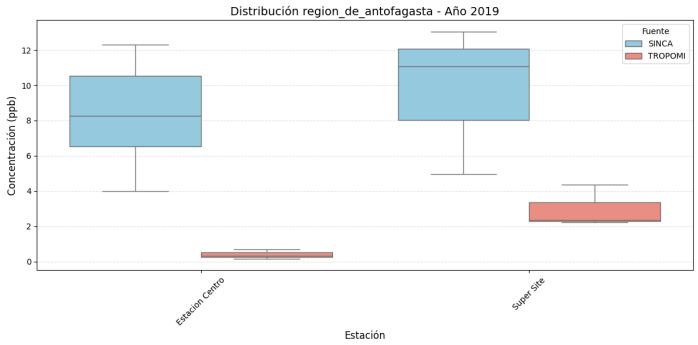


Figura E.2: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2019.

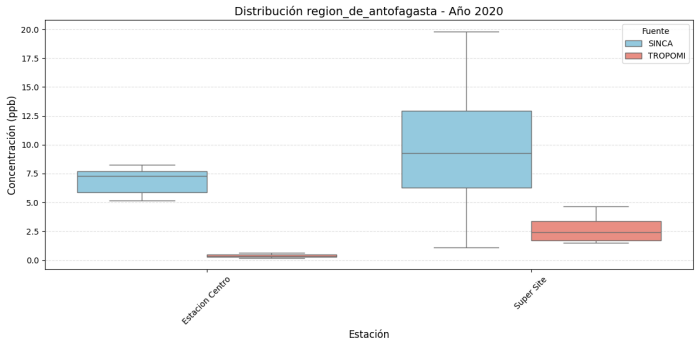


Figura E.3: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2020.

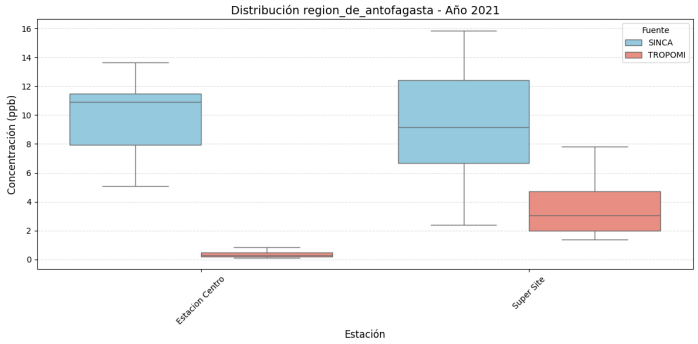


Figura E.4: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2021.

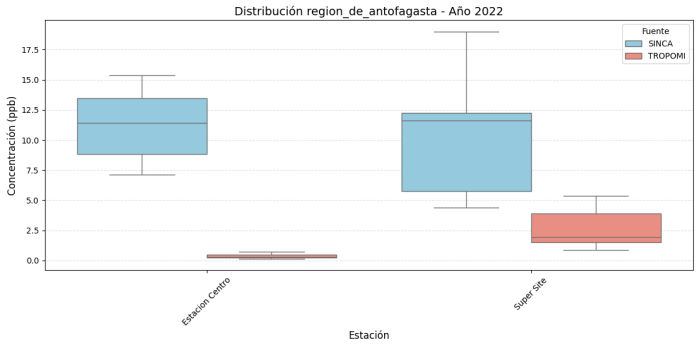


Figura E.5: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2022.

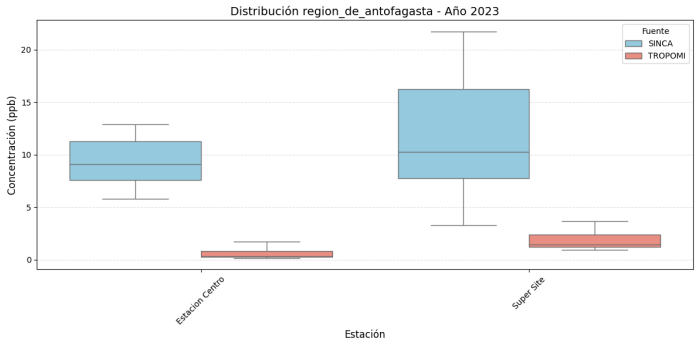


Figura E.6: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2023.

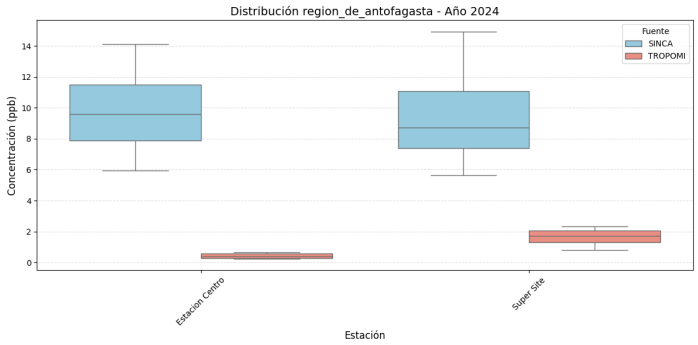


Figura E.7: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Antofagasta durante el año 2024.

E.2. Región de Valparaíso

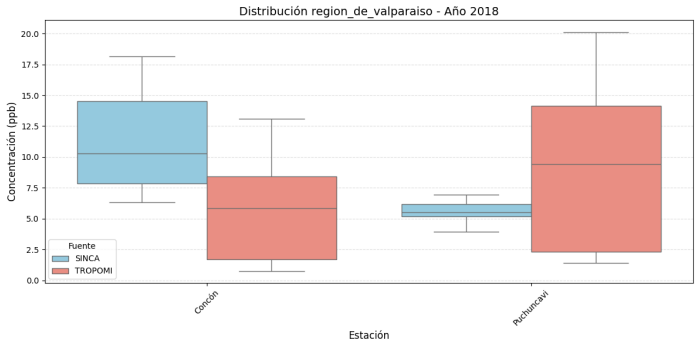


Figura E.8: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2018.

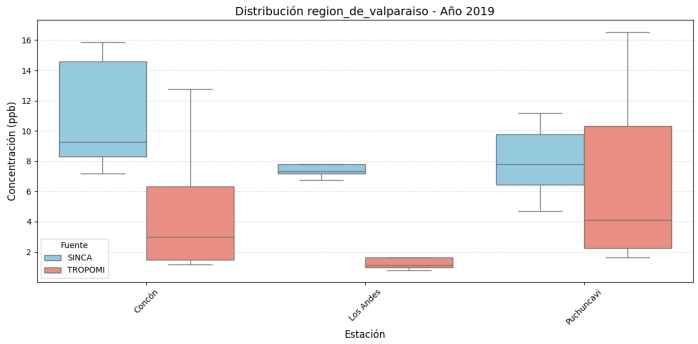


Figura E.9: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2019.

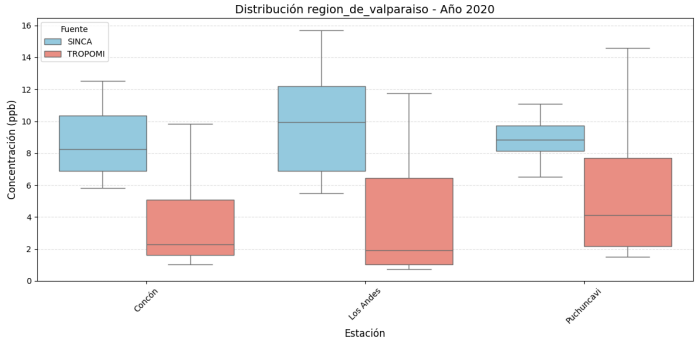


Figura E.10: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2020.

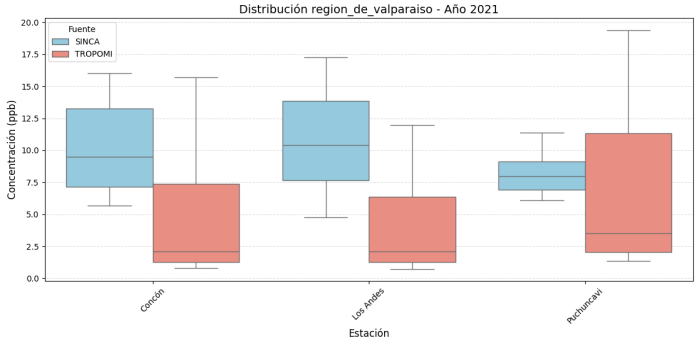


Figura E.11: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2021.

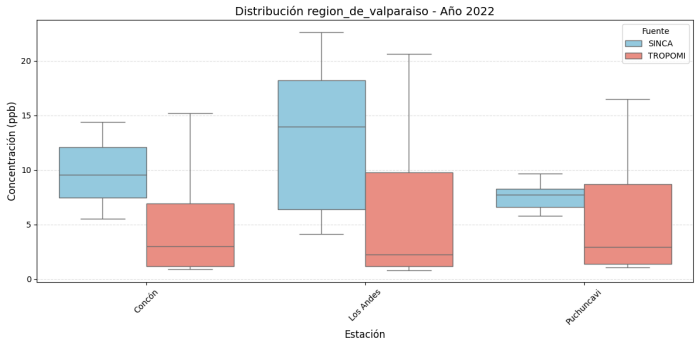


Figura E.12: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2022.

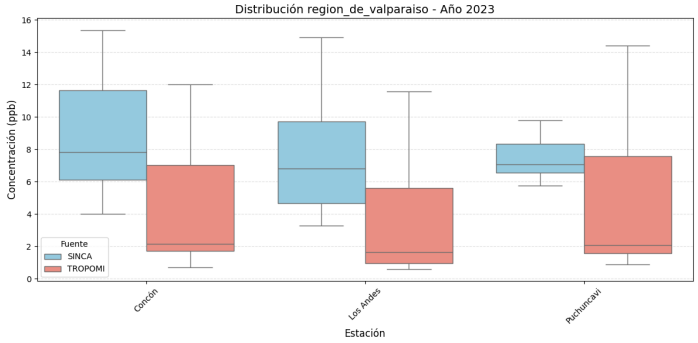


Figura E.13: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2023.

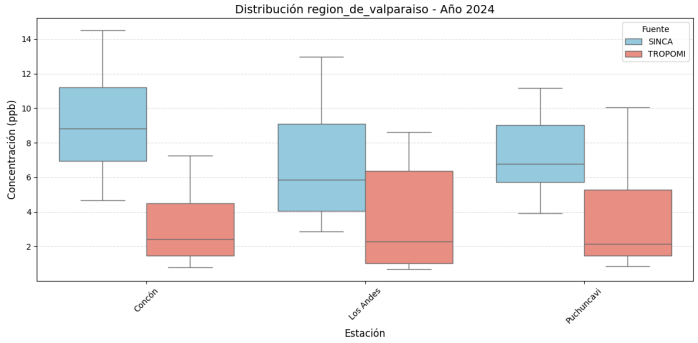


Figura E.14: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región de Valparaíso durante el año 2024.

E.3. Región Metropolitana de Santiago

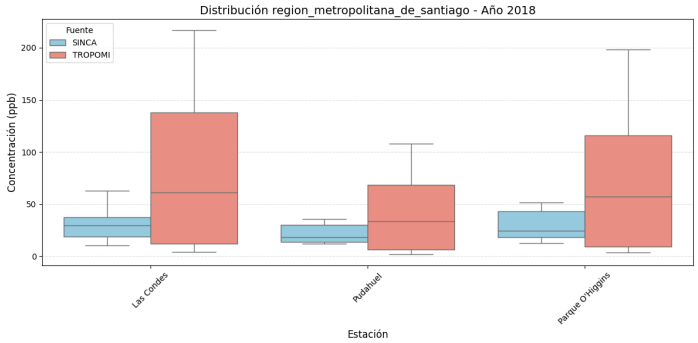


Figura E.15: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2018.

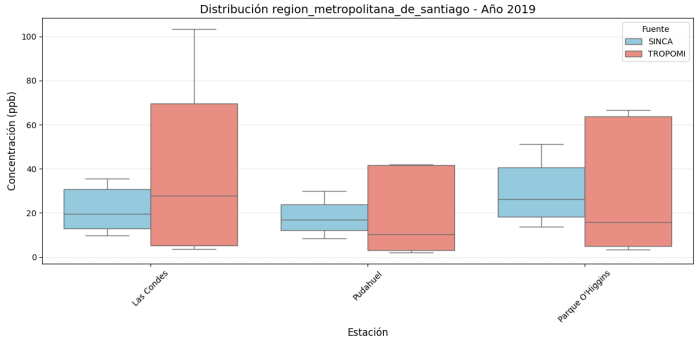


Figura E.16: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2019.

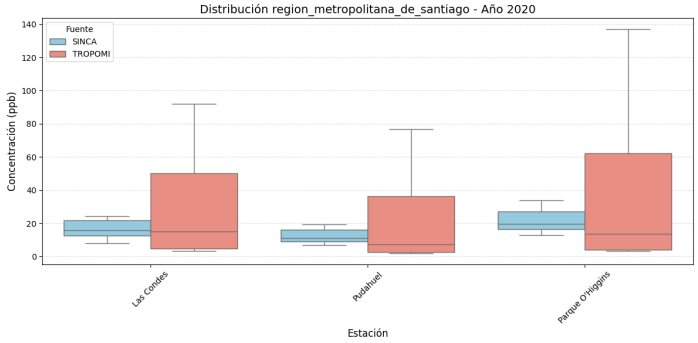


Figura E.17: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2020.

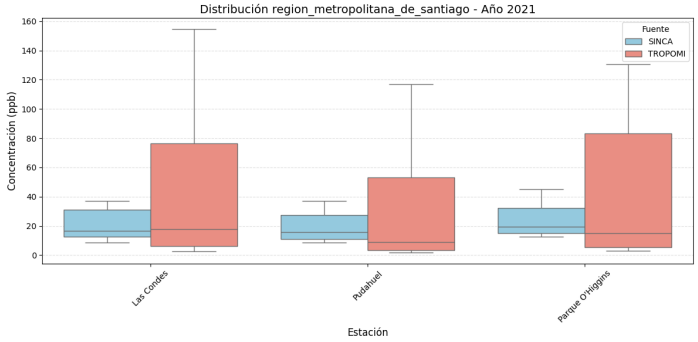


Figura E.18: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2021.

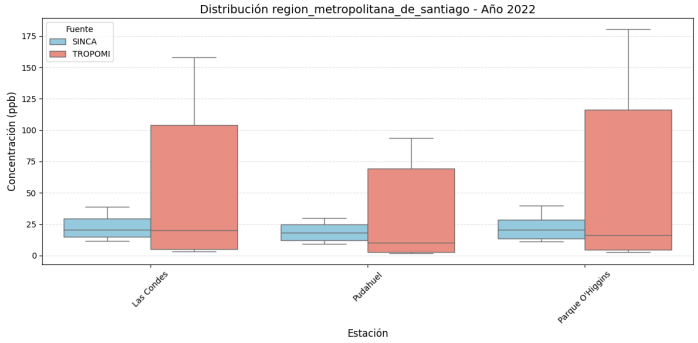


Figura E.19: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2022.

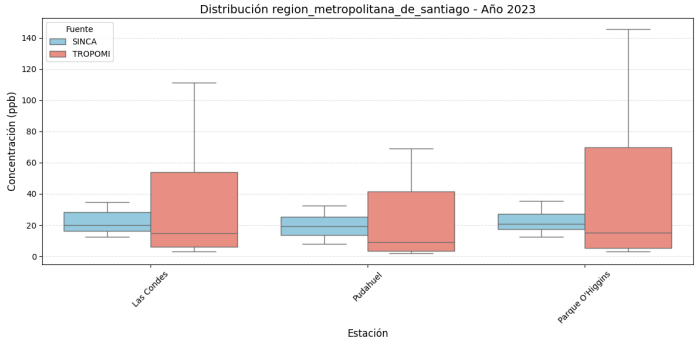


Figura E.20: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2023.

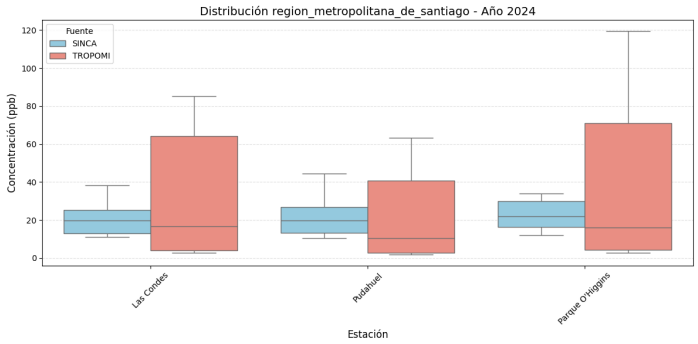


Figura E.21: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago durante el año 2024.

E.4. Región del Bíobio

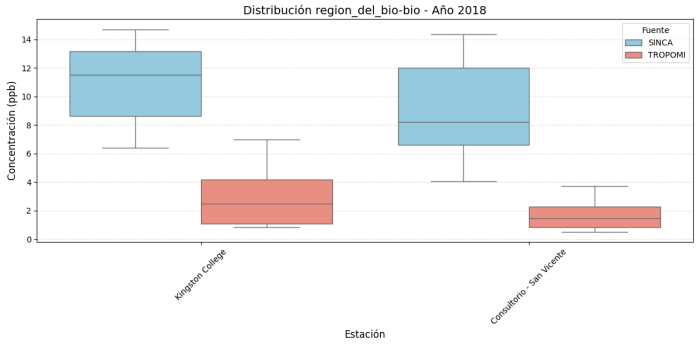


Figura E.22: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2019.

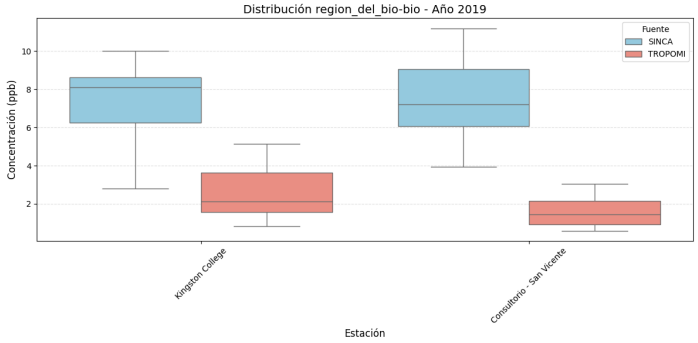


Figura E.23: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2019.

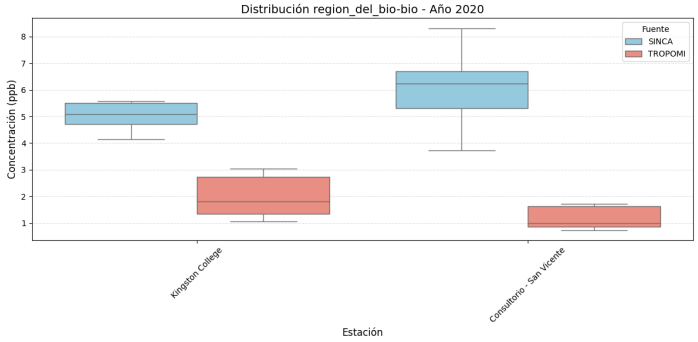


Figura E.24: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2020.

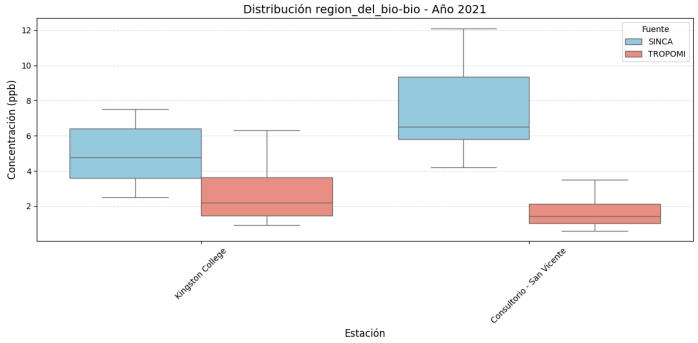


Figura E.25: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2021.

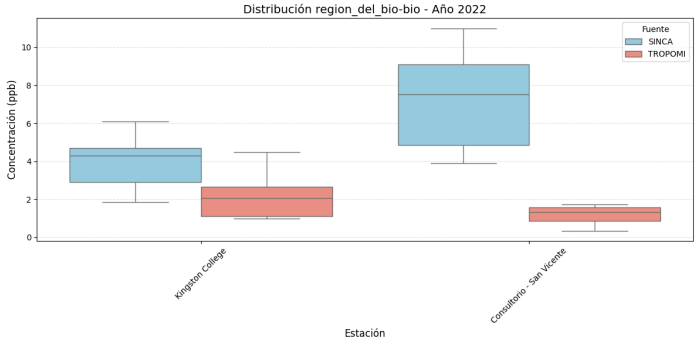


Figura E.26: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2022.

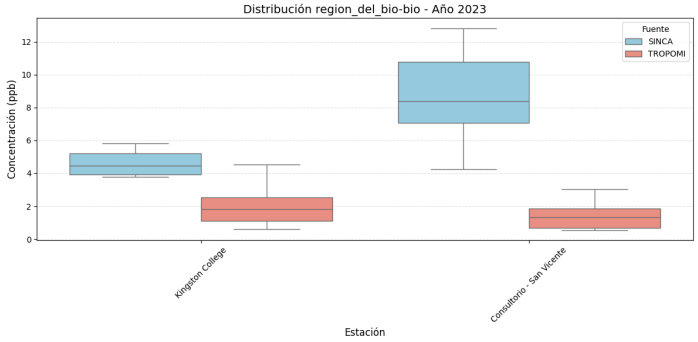


Figura E.27: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2023.

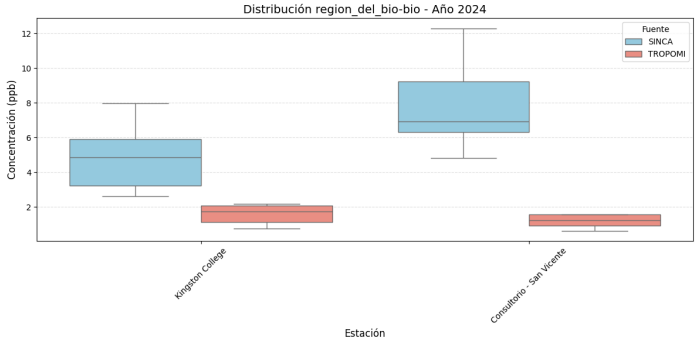


Figura E.28: Distribución de concentraciones de NO_2 en la Región del Bíobio durante el año 2024.

Apéndice F

Mapas comparativos de fuentes de datos

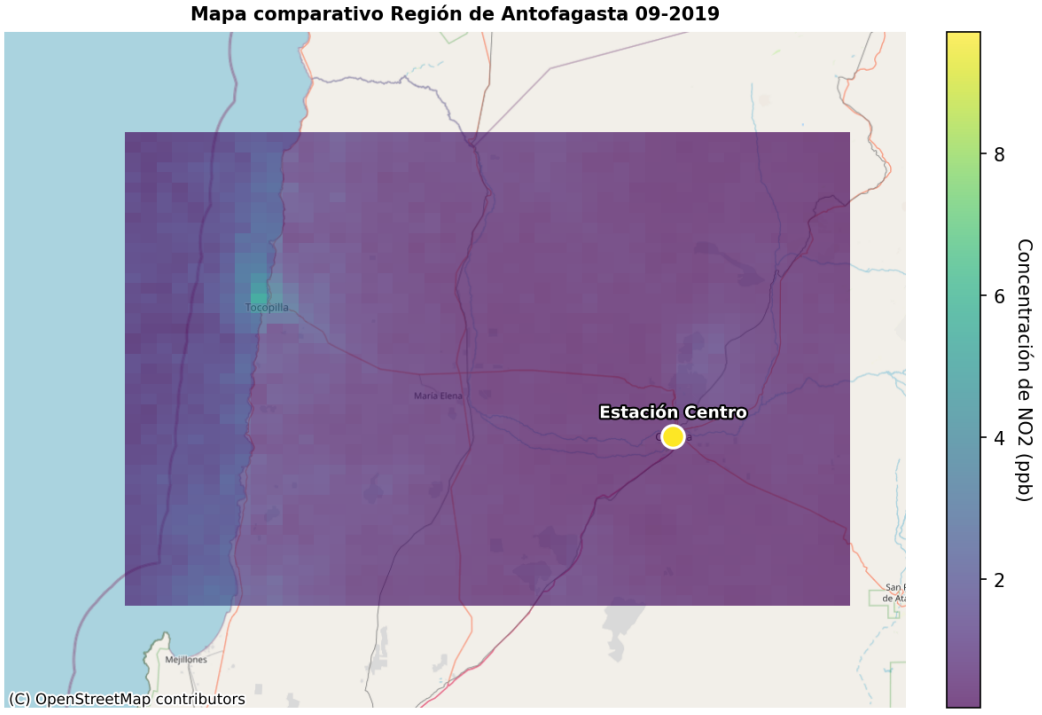


Figura F.1: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Antofagasta (septiembre 2019). Se contrastan los registros en terreno de SINCA (círculos) con los datos satelitales de TROPOMI (mapa de calor).

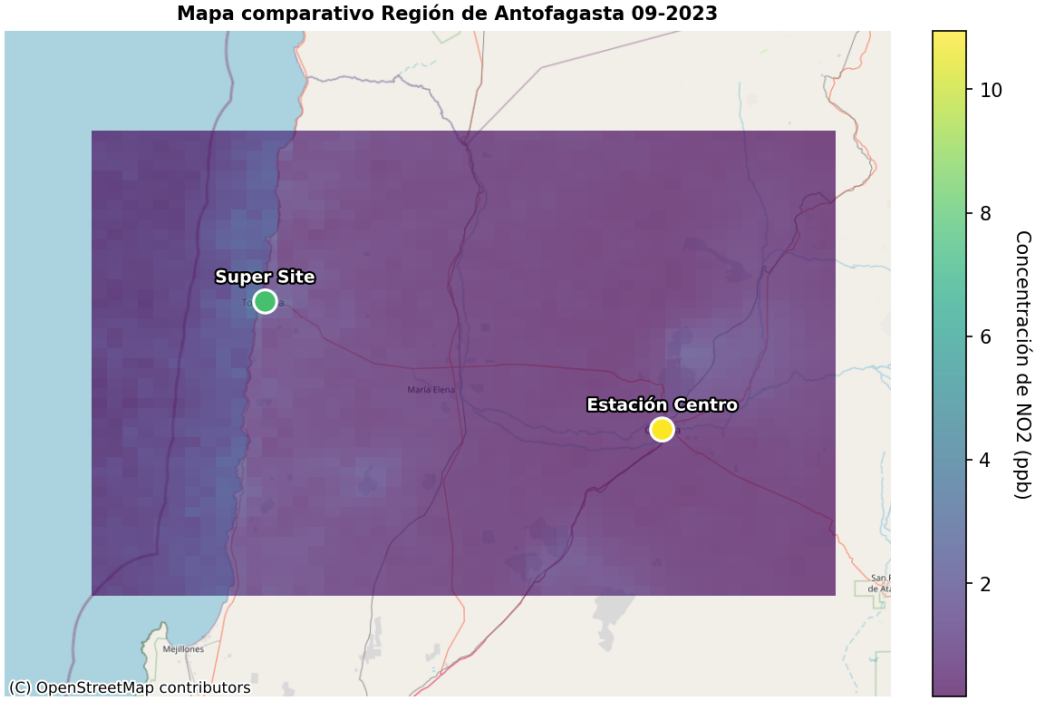


Figura F.2: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Antofagasta (septiembre 2023). Se observan las diferencias entre estaciones SINCA (círculos) y la estimación satelital TROPOMI (mapa de calor).

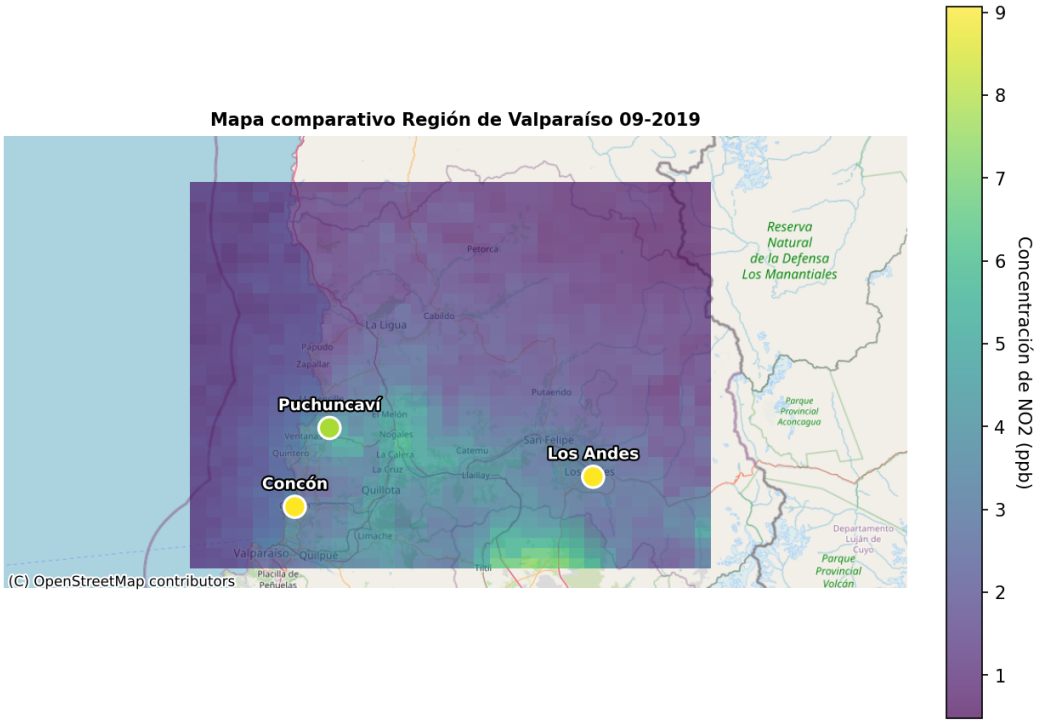


Figura F.3: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Valparaíso (septiembre 2019). Superposición de datos SINCA (círculos) sobre la trama satelital TROPOMI.

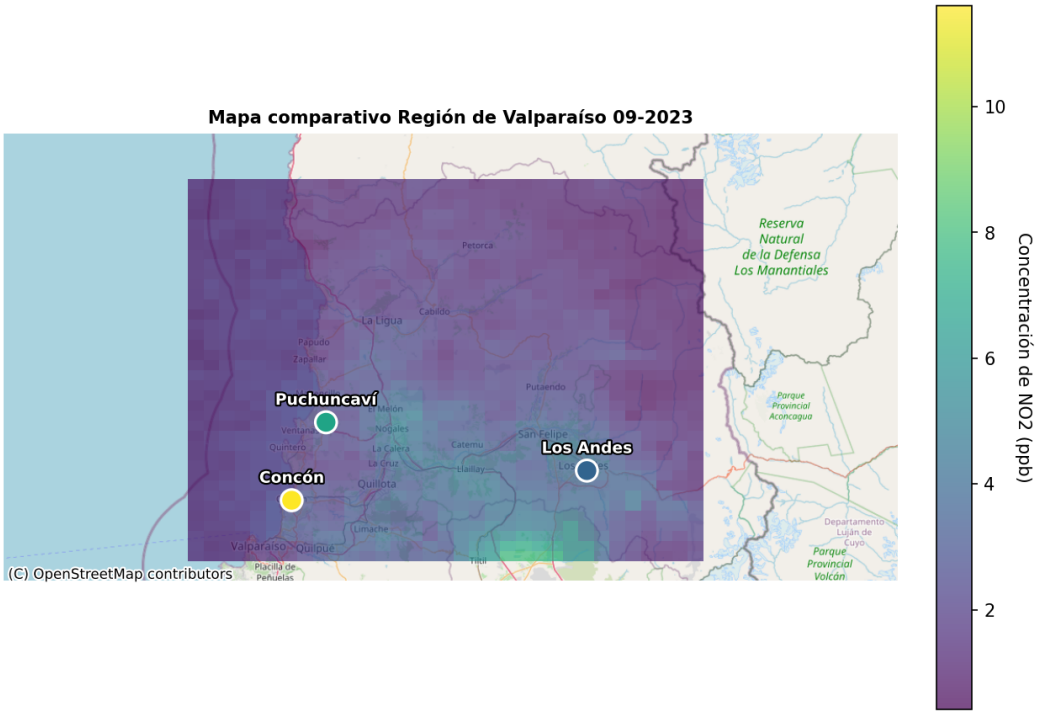


Figura F.4: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región de Valparaíso (septiembre 2023). Visualización de registros puntuales SINCA frente a la distribución espacial de TROPOMI.

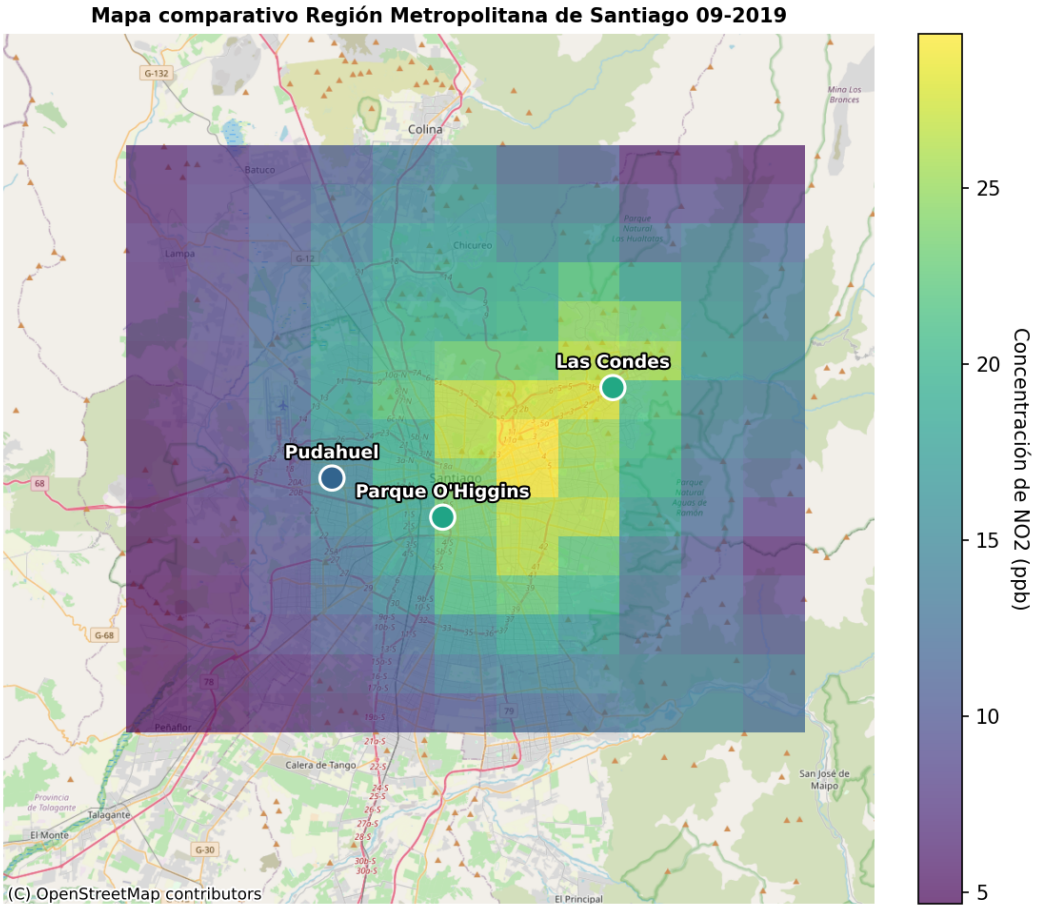


Figura F.5: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago (septiembre 2019). Contraste entre monitoreo en terreno (círculos SINCA) y teledetección (mapa de calor TROPOMI).

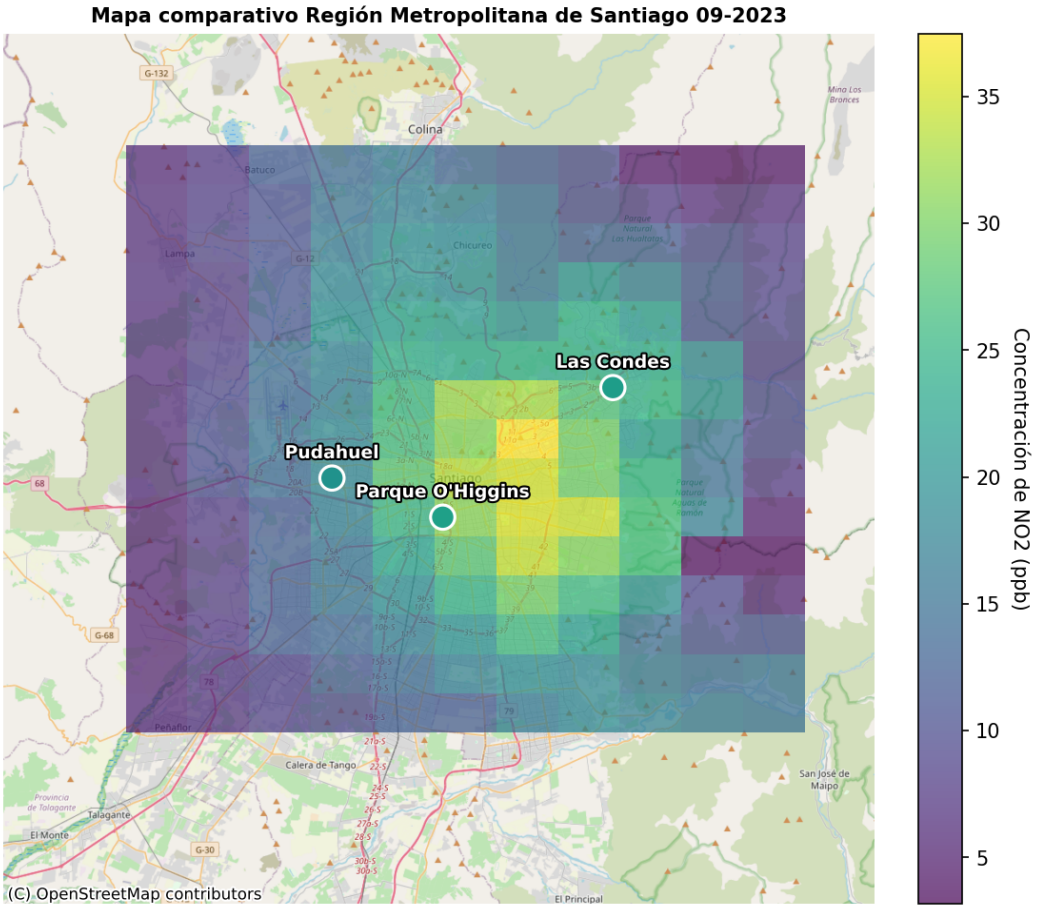


Figura F.6: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región Metropolitana de Santiago (septiembre 2023). Evolución espacial observada mediante datos SINCA y TROPOMI.

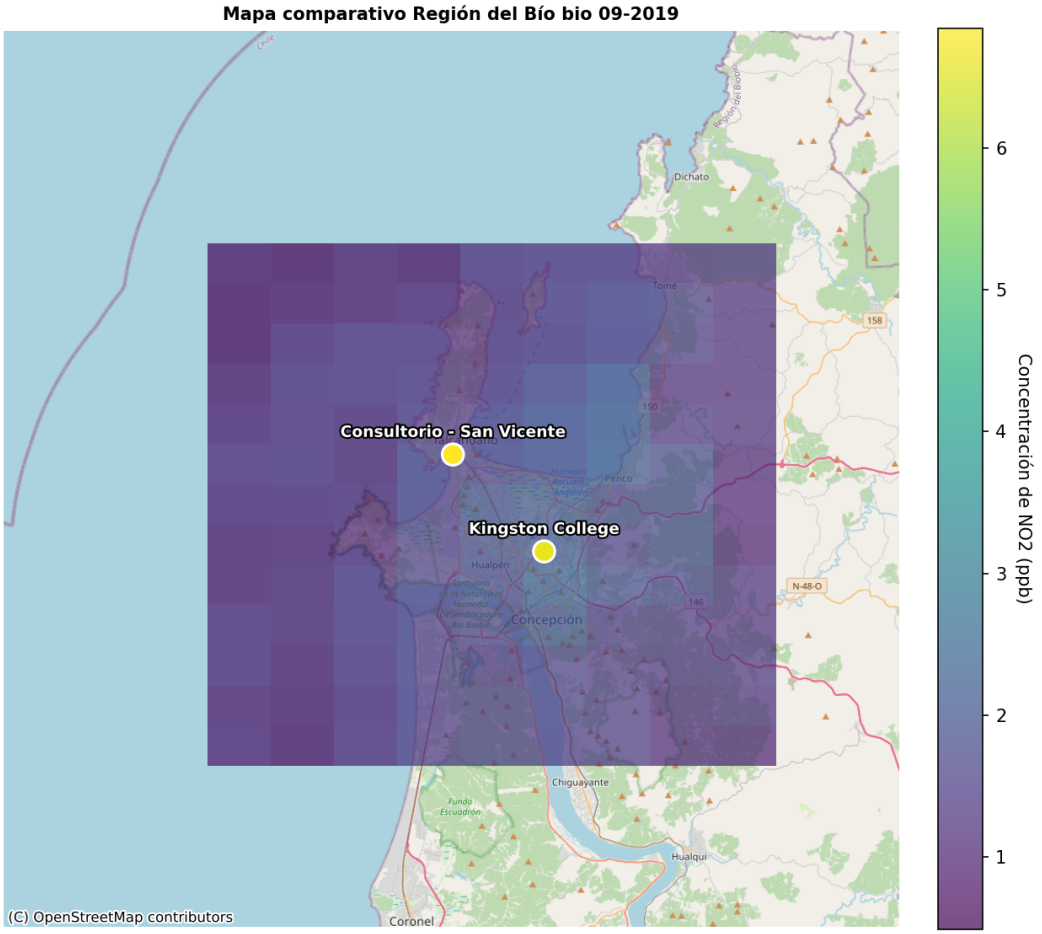


Figura F.7: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región del Biobío (septiembre 2019). Distribución espacial según TROPOMI (calor) y mediciones locales SINCA (círculos).

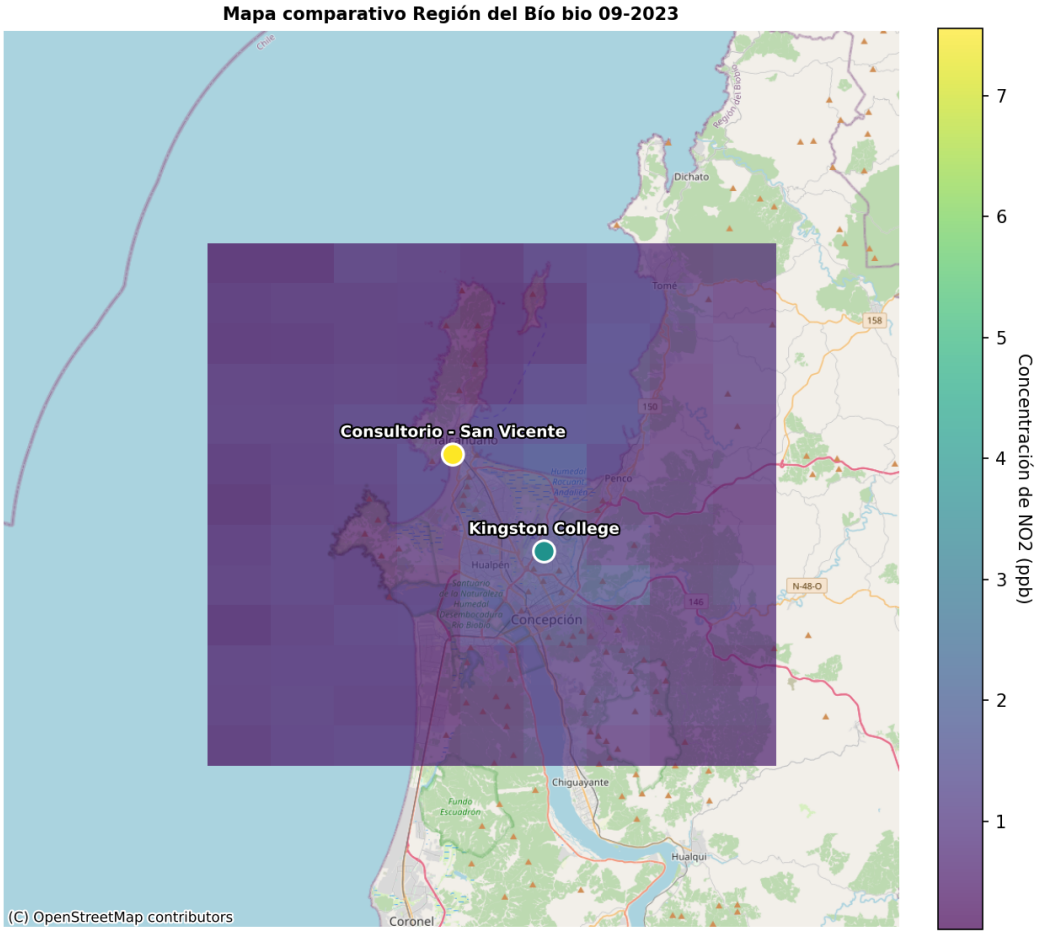


Figura F.8: Mapa comparativo de concentración superficial de NO_2 en la Región del Biobío (septiembre 2023). Comparación visual entre fuentes de datos terrestres y satelitales.