



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE AEROSOLES GENERADOS
POR LOS INCENDIOS FORESTALES EN AUSTRALIA (2019-
2020) HACIA LOS ANDES CENTRALES DE CHILE**

Memoria de Título presentada por

Jesús Ignacio Morales Arredondo

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Dr. Tomás R. Bolaño Ortiz
Profesor coreferente
Dra. Lina Mabel Castro
Octubre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Análisis del transporte de aerosoles generados por los incendios forestales en Australia (2019-2020) hacia Los Andes centrales de Chile

Nombre del candidato(a): Jesús Ignacio Morales Arredondo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Tomás R. Bolaño Ortiz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) 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)

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: 10/11/2025

Firma:

Firmado digitalmente
por Tomás R. Bolaño
Ortiz
Fecha: 2025.11.10
15:24:49 -03'00'

Profesor(a) Correferente:

Fecha: 10/11/2025

Firma:

Lina Mabel Castro H

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 10/11/2025

Firma:

[Firma manuscrita]

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.

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE AEROSOLES GENERADOS POR LOS INCENDIOS FORESTALES EN AUSTRALIA (2019-2020) HACIA LOS ANDES CENTRALES DE CHILE

Jesús Morales¹, Tomás R. Bolaño², Lina Castro¹

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María

² Escuela de Ingeniería en Recursos Naturales, Universidad Católica del Maule

Resumen

El presente estudio se realizó con el objetivo de analizar el transporte de aerosoles generados por los incendios forestales de Australia conocidos como "Black Summer" (2019-2020) hacia la región de Los Andes, Chile. Esta investigación surge de la necesidad de comprender la interconexión global de los efectos ambientales causados por estos eventos, que incluyen impactos en la calidad del aire, la salud humana y los ecosistemas sensibles como la criósfera chilena.

Para llevar a cabo el análisis, se utilizó una combinación de herramientas tecnológicas y metodologías avanzadas. Esto incluyó la revisión de literatura científica, la recolección de datos satelitales mediante sensores remotos como CALIPSO y plataformas como Earthnullschool, y la comparación con datos obtenidos de estaciones de monitoreo locales de la red del Sistema de Información Nacional de la Calidad del Aire (SINCA). Adicionalmente, se empleó el modelo HYSPLIT para determinar la trayectoria y dispersión de los aerosoles, evaluando tanto su transporte como su impacto en la región de estudio. La escasez de estaciones activas durante las fechas clave del fenómeno representó una limitación importante en el análisis, evidenciando la necesidad de fortalecer las capacidades de monitoreo local.

Los resultados muestran que los aerosoles generados por los incendios australianos del verano 2019–2020 alcanzaron Sudamérica con un intervalo cercano a una semana, siendo identificados en cuatro eventos clave mediante plataformas satelitales y modelos de trayectoria. Uno de los eventos más significativos ocurrió el 16 de enero de 2020, cuando las simulaciones de HYSPLIT y los datos del modelo GEOS-5 indicaron la llegada de una pluma de humo a la zona central de Chile, lo que coincidió con un incremento de PM_{2.5} registrado en las estaciones de Viña del Mar y Las Condes. Estos aerosoles, además de afectar la calidad del aire, podrían depositarse en zonas sensibles como la criósfera andina, contribuyendo al derretimiento acelerado de la nieve por efecto de partículas oscuras como el black carbon, lo que pone en riesgo la disponibilidad de recursos hídricos esenciales para la región central de Chile.

En conclusión, este estudio evidencia la magnitud de los impactos ambientales de los incendios forestales a nivel global y subraya la importancia de continuar investigando el transporte transcontinental de contaminantes. Se evidencia la necesidad de continuar investigando este tipo de transporte de aerosoles, por medio de la mejora de redes de monitoreo y fomentar la colaboración interdisciplinaria para comprender mejor estos procesos atmosféricos, permitiendo así proponer medidas para mitigar estos efectos, formular políticas públicas efectivas y proteger a las comunidades y ecosistemas afectados.

1 Introducción

El transporte transcontinental de contaminantes atmosféricos, como los aerosoles generados por incendios forestales, es un fenómeno ambiental de creciente preocupación. Estos aerosoles, especialmente partículas finas como el material particulado PM_{2.5}, pueden recorrer grandes distancias en la atmósfera, afectando regiones ubicadas a miles de kilómetros de su fuente (Reid et al., 2016). Su presencia en zonas remotas no solo deteriora la calidad del aire, sino que también representa un riesgo para la salud humana y los ecosistemas sensibles (Kaiser et al., 2012).

En las últimas décadas, el aumento de la intensidad y frecuencia de incendios forestales ha sido vinculado al cambio climático, siendo los eventos de megaincendios cada vez más comunes (Flannigan et al., 2009). Estos incendios no solo generan impactos locales, sino que pueden tener efectos a nivel intercontinental debido a la liberación de grandes cantidades de contaminantes (Zhang et al., 2008). Además, se han observado trayectorias de transporte atmosférico similares en otros eventos globales, lo que respalda la necesidad de comprender estos procesos en detalle (Lai & Brimblecombe, 2021). Un ejemplo reciente de este fenómeno es el “Black Summer” en Australia, ocurrido entre septiembre de 2019 y febrero de 2020, uno de los incendios más destructivos registrados en la historia del país (Simmons et al., 2022). Su magnitud provocó una liberación masiva de contaminantes que cruzaron el océano Pacífico alcanzando América del Sur, como fue evidenciado en Punta Arenas, Chile (Ohneiser et al., 2020).

La llegada de estos aerosoles a regiones como los Andes centrales plantea interrogantes sobre su impacto en la criósfera. Partículas como el black carbon pueden depositarse en superficies nevadas, disminuyendo su albedo y acelerando el derretimiento de la nieve (Flanner et al., 2007). Este tipo de deposición ha sido identificado como un factor de riesgo para la reducción de masa glaciaria en los Andes de Chile central (Cereceda-Balic et al., 2020). Investigaciones realizadas en otros territorios han mostrado efectos similares, como en Nueva Zelanda, donde la deposición de LAPs desde incendios australianos aumentó la tasa de fusión glaciaria durante el verano austral (Qin et al., 2021).

La pérdida de masa de nieve y hielo en los Andes tiene implicancias directas sobre la disponibilidad hídrica en la zona central de Chile, que depende del deshielo estacional para el abastecimiento de agua potable, riego y producción energética (Orell, 2020). Esta situación se agrava en el contexto del cambio climático y las crisis hídricas recurrentes que enfrenta la región (Alvarez-Garretón et al., 2023). Frente a esto, es fundamental evaluar cómo el transporte de contaminantes puede incidir en los recursos hídricos estratégicos del país (Ulloa, 2020).

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, comprender los efectos del transporte atmosférico de aerosoles permite integrar estos factores en la planificación de infraestructura, en la gestión del recurso hídrico y en la evaluación de riesgos naturales (Hadley & Kirchstetter, 2012). Además, permite proponer soluciones más resilientes frente a escenarios extremos de contaminación o variabilidad climática (Usha et al., 2022).

Esta memoria tiene como objetivo analizar el transporte de aerosoles emitidos durante el evento “Black Summer” hacia los Andes Centrales de Chile. Para ello, se utilizaron datos satelitales (CALIPSO, GEOS-5), el modelo de trayectorias atmosféricas HYSPLIT y registros de calidad del aire del sistema SINCA. El trabajo se estructura en cinco capítulos: el capítulo 2 presenta el marco teórico; el capítulo 3 describe la metodología; el capítulo 4 expone los resultados; y el capítulo 5 entrega las conclusiones y proyecciones de este estudio.

2 Marco Teórico

2.1 Transporte de aerosoles atmosféricos

La investigación sobre el transporte de aerosoles y partículas emitidas por incendios forestales ha experimentado un crecimiento considerable en las últimas décadas, debido a sus efectos adversos sobre la calidad del aire, la salud humana y el cambio climático global. Este aumento en el interés ha sido

impulsado por avances tecnológicos, como los sensores remotos y los modelos de simulación atmosférica, que han permitido observar fenómenos antes difíciles de medir (Reid et al., 2016). Por ejemplo, se ha demostrado que los aerosoles derivados de incendios pueden modificar el albedo de la nieve, acelerando su derretimiento y alterando la dinámica climática regional (Flanner et al., 2009). Además, estudios han documentado que estos aerosoles pueden ser transportados a largas distancias, afectando regiones remotas no expuestas directamente al fuego (Kaiser et al., 2012). Actualmente, instrumentos satelitales como MODIS y MISR, operados por la NASA, permiten monitorear la distribución global de aerosoles, su interacción con cuerpos de agua, cobertura terrestre y sistemas atmosféricos (Levy et al., 2013).

2.2 Daños a la Salud

La exposición al humo de incendios forestales ha demostrado tener varios impactos en la salud humana. Estudios previos realizados en la ciudad australiana de Sídney (Morgan et al., 2010) han vinculado la exposición a material particulado fino (PM_{10}) de incendios forestales con un aumento en la mortalidad diaria y admisiones hospitalarias debido a enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Además, esta exposición puede empeorar los síntomas del asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares y causar irritación en los ojos, la nariz y la garganta. De hecho, se puede apreciar en la Figura 1 como los peaks de las partículas PM_{10} se asocian con las alzas de admisiones hospitalarias en Sídney.

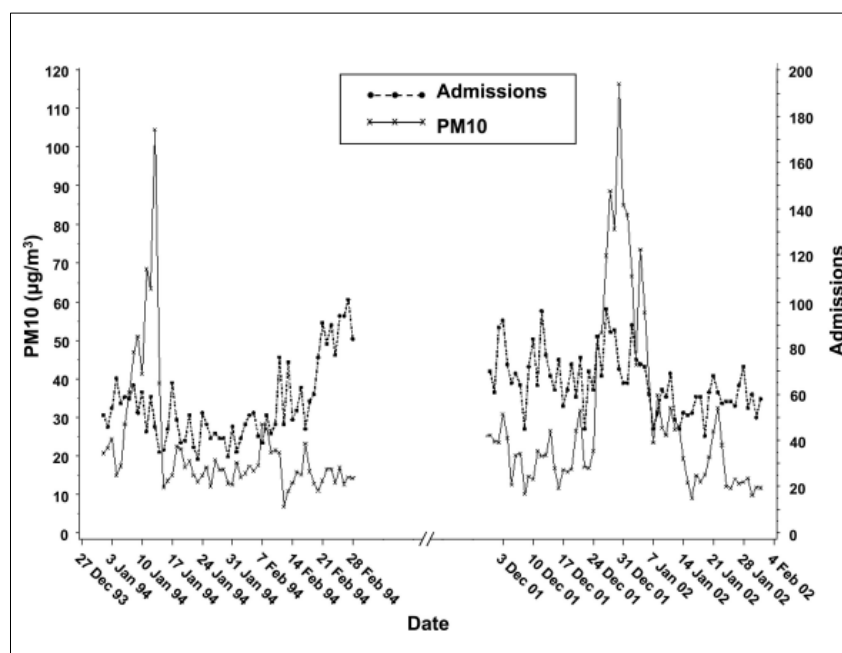


Figura 1. Comportamiento de admisiones hospitalarias diarias y PM_{10} diario durante los dos grandes incendios de Sídney, enero 1994 y diciembre 2001. Fuente: Effects of Bushfire Smoke on Daily Mortality and Hospital Admissions in Sydney, Australia. (Morgan et al., 2010)

En Chile, el estudio de Arrizaga et al. (2023) mostró que la ocurrencia de grandes incendios forestales eleva en promedio un 10 % las concentraciones de $PM_{2.5}$ incluso en municipios ubicados hasta 200 km del foco del fuego, lo que se traduce en un aumento de las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias agudas. Por su parte, Ciciretti et al. (2022) documentaron que en Santiago y Valparaíso la exposición al humo de incendios dispara los casos de bronquitis y neumonía infantil, subrayando la vulnerabilidad de los grupos más jóvenes frente a episodios extremos de contaminación por humo

2.3 Sustancias Peligrosas Liberadas durante Incendios

Cuando arden grandes extensiones de biomasa, se liberan gases como monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) producto de la combustión incompleta (Andreae & Merlet, 2001). Al mismo tiempo, los incendios emiten óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles que favorecen la formación de ozono en la troposfera. El material particulado fino (PM_{2.5} y PM₁₀), capaz de elevarse a la atmósfera y recorrer largas distancias, se asocia con un incremento en la morbilidad respiratoria y cardiovascular (Johnston et al., 2012). Además, el negro de carbón (black carbon) ejerce un forzamiento radiativo positivo al depositarse sobre superficies claras, contribuyendo al calentamiento regional (Bond et al., 2013).

El mega incendio ocurrido durante el "Black Summer" en Australia entre 2019 y 2020 liberó diversos gases y aerosoles a la atmósfera, incluyendo CO, dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), partículas de materia orgánica y partículas inorgánicas. La campaña de investigación "Characterizing Organics and Aerosol Loading over Australia" (COALA), que tuvo lugar desde enero hasta marzo de 2020, proporcionó mediciones detalladas del humo de los incendios forestales, lo que permitió una mejor comprensión de la composición química (ver Figura 2) de los humos y sus posibles efectos en la salud (Simmons et al., 2022).

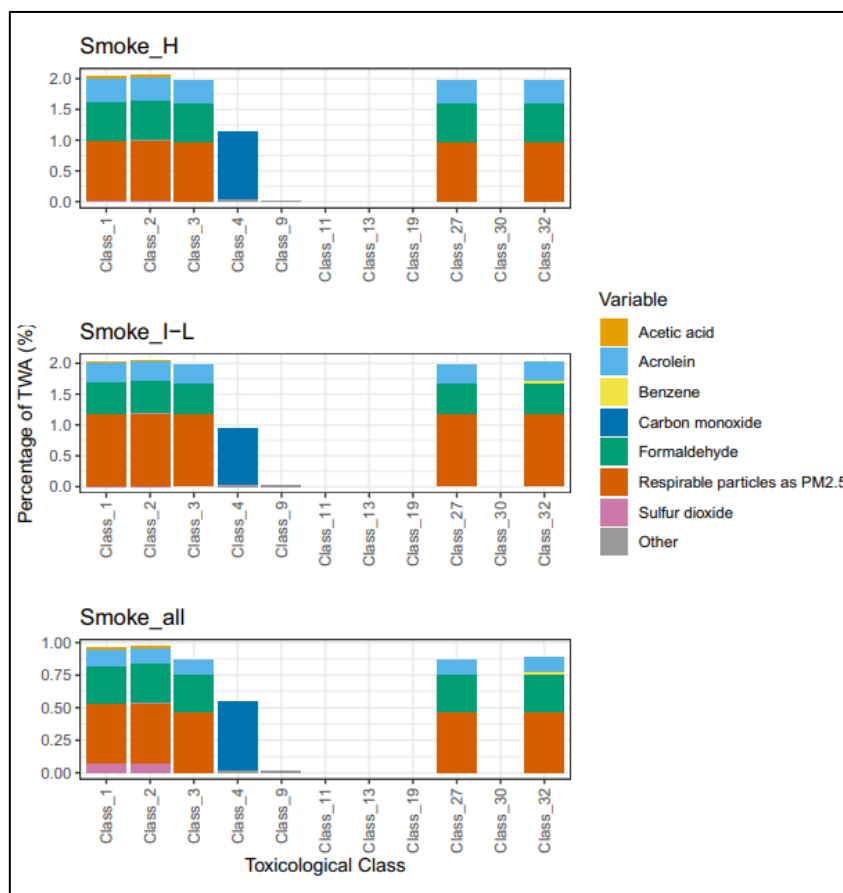


Figura 2. Composición química de los humos de los incendios realizado por la campaña COALA. Fuente: Bushfire smoke plume composition and toxicological assessment from the 2019–2020 Australian Black Summer. (Simmons et al., 2022).

En Chile, los incendios forestales también generan una amplia gama de contaminantes atmosféricos que incluyen gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado fino (PM_{2.5}). Durante los incendios del verano de 2017 —la temporada más destructiva registrada en el país— se observaron concentraciones extremas de PM_{2.5} en comunas como San Fernando y Talca, las que superaron los 200 µg/m³, duplicando el límite diario establecido por la norma nacional (Arrizaga et al., 2023). Este episodio afectó a más de

5000 km², multiplicando por catorce el promedio anual de superficie quemada entre 1985 y 2016, y generando condiciones críticas de contaminación atmosférica en zonas urbanas alejadas del foco del fuego (CONAF, 2017; Úbeda & Sarricolea, 2016). Estos incendios, al ocurrir sobre vegetación nativa y zonas agroforestales, liberan compuestos orgánicos complejos y metales pesados que pueden depositarse en suelos y cuerpos de agua cercanos, incrementando el riesgo ambiental más allá de la calidad del aire.

2.4 Efectos Intercontinental de Contaminación Atmosférica

Se han demostrado en estudios como los aerosoles generados en Asia (China, Japón y Corea del Sur) se transportan por el Océano Pacífico hacia Estados Unidos afectando la calidad del aire en la zona (Liu et al., 2008), como también desde Canadá producto de los incendios boreales del 2017, se inyectaron estos aerosoles en la estratosfera, lo que permitió su transporte a grandes distancias debido a la altitud que alcanzaron durante su desplazamiento (Torres et al., 2020). Además, se han documentado fenómenos como la “escalera solar” durante los incendios del Black Saturday en Australia (2009), donde los aerosoles se elevaron debido a su absorción de radiación solar y facilitaron el transporte intercontinental (De Laat et al., 2011)

También en los últimos años diversos estudios han mostrado como las plumas de humos generados por incendios generados en Australia llegan a Chile. Un estudio sobre la observación del humo de los incendios forestales australianos en la estratosfera sobre Punta Arenas, Chile (Ohneiser et al., 2020), brinda información crucial sobre la distribución vertical y horizontal del humo en la atmósfera de esa región, teniendo una altura de llegada de estas entre 10 a 25 [km] de altura, y dispersándose horizontalmente (ver Figura 3).

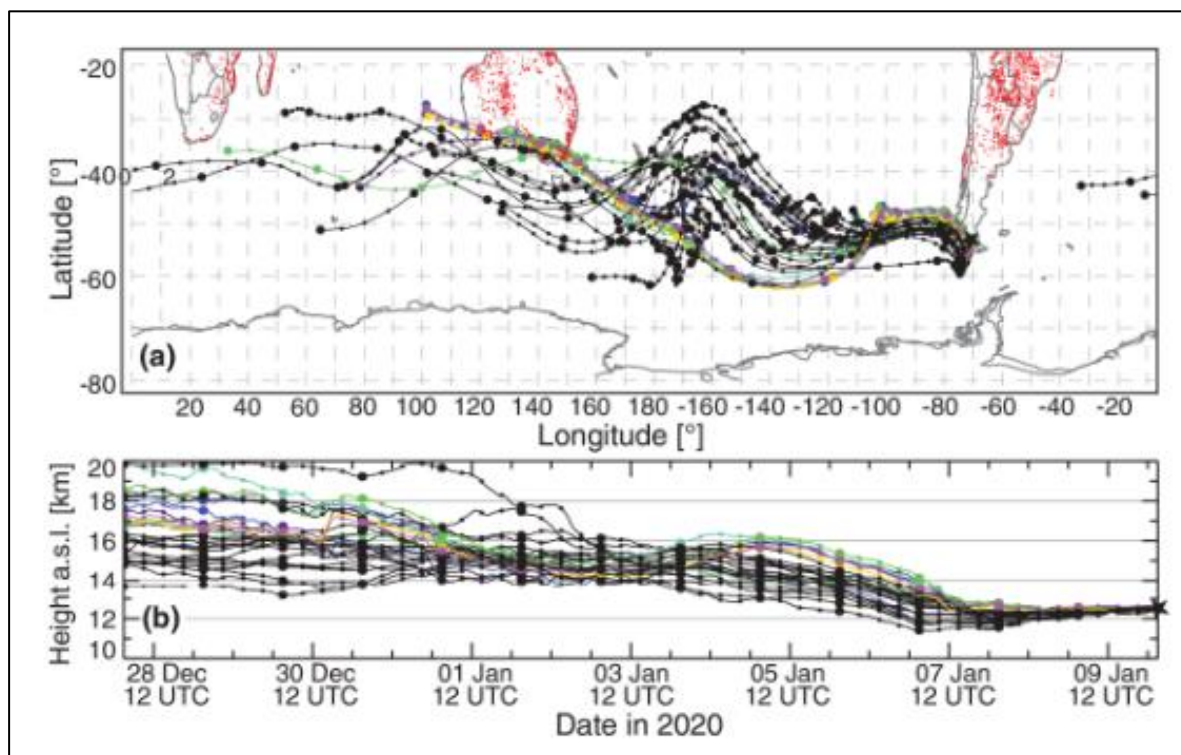


Figura 3. 13 Retrotrayectorias de partículas que llegan a punta arenas el 10 de enero de 2020). Fuente: Smoke of extreme Australian bushfires observed in the stratosphere over Punta Arenas, Chile, in January 2020: optical thickness, lidar ratios, and depolarization ratios at 355 and 532 nm. (Ohneiser et al., 2020)

Estos estudios evidencian como los aerosoles generados por incendios pueden transportarse por grandes distancias, afectando la calidad del aire y el clima globalmente, resaltando la importancia de rastrear este transporte atmosférico para conocer sus efectos.

2.5 Sensores remotos para el estudio de aerosoles atmosféricos

Los sensores remotos desempeñan un papel fundamental en la investigación ambiental al proporcionar una herramienta valiosa para la observación y el monitoreo de la Tierra desde el espacio (Kuenzer & Dech, 2013). Estos instrumentos utilizan tecnología avanzada para recopilar datos e imágenes de la superficie terrestre y la atmósfera sin la necesidad de un contacto físico directo (Schowengerdt, 2007). La capacidad de observar y medir fenómenos terrestres a gran escala desde una perspectiva global ha revolucionado la forma en que comprendemos y abordamos una amplia gama de problemas ambientales (Lillesand et al., 2015). Estos sensores pueden ser activo o pasivos. Estos últimos suelen ser los más utilizados por qué mejor eficiencia energética para lograr una mejor resolución temporal y espacial. Los sensores pasivos operan en función del principio de detección de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Estos instrumentos capturan datos en diferentes bandas espectrales, incluyendo el espectro visible, infrarrojo y microondas (Jensen, 2006). La radiación electromagnética es emitida o reflejada por la Tierra y es recogida por los sensores remotos a bordo de satélites, aviones o drones. A partir de estos datos, se generan imágenes e información sobre una amplia variedad de características y fenómenos terrestres (Campbell & Wynne, 2011).

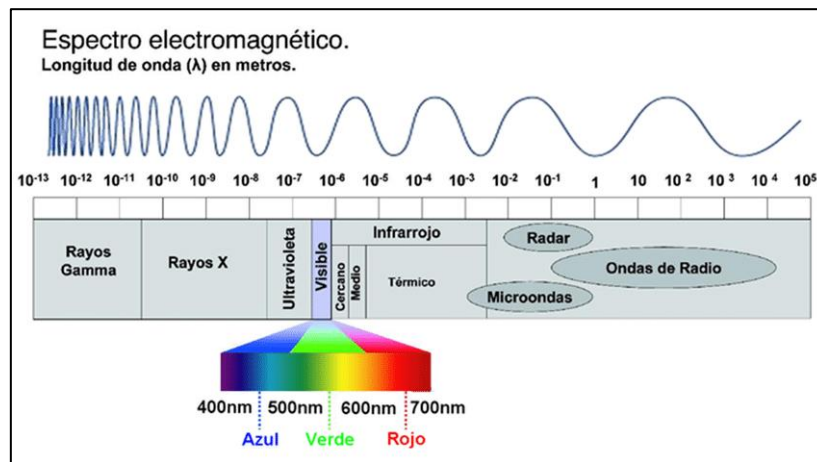


Figura 4. Espectro electromagnético según longitudes de onda. Fuente: Viera González, P. M. (2014). *Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Los instrumentos como MODIS a bordo de los satélites TERRA y AQUA permiten monitorear columnas de humo y rastrear su desplazamiento transcontinental mediante imágenes multiespectrales (Ichoku et al., 2003), mientras que el CALIOP a bordo del satélite CALIPSO proporciona perfiles verticales detallados de la atmósfera (Winker et al., 2009), identificando capas de aerosoles a distintas altitudes. Esta integración de tecnologías facilita la comprensión de rutas de transporte aéreo y sus posibles impactos en regiones distantes, contribuyendo al análisis de fenómenos globales como la propagación de aerosoles generados por incendios forestales (Hoff & Christopher, 2009).

Diversos estudios han demostrado que la combinación de datos satelitales con observaciones terrestres mejora significativamente la caracterización de los aerosoles. Verma et al. (2019) destacan cómo redes, como por ejemplo AERONET, al integrarse con sensores remotos, permiten estimar parámetros fundamentales como el espesor óptico de aerosoles (AOD), la distribución de tamaños de partículas y sus propiedades ópticas. Esta complementariedad entre sistemas satelitales y estaciones en superficie contribuye a validar modelos y aumentar la confiabilidad de los productos derivados.

Asimismo, el uso de sensores infrarrojos desde plataformas satelitales permite detectar aerosoles incluso en condiciones con nubosidad parcial o durante la noche, ampliando la cobertura temporal de las observaciones (Ackerman & Chung, 1996).

Lin et al. (2021) realizaron una clasificación global de aerosoles utilizando datos combinados de MODIS y AERONET, distinguiendo entre aerosoles urbanos, desérticos, marinos y de biomasa. Este enfoque

permite identificar patrones de distribución espacial y conectar directamente las fuentes de emisión con su impacto regional e intercontinental.

Por otro lado, Mushtaq et al. (2022) realizaron una revisión del estado del arte en sensores y tecnologías aplicadas a aerosoles, mostrando cómo los avances más recientes han mejorado la precisión, cobertura y resolución espacial de las mediciones, permitiendo una mejor evaluación de su efecto en el clima, visibilidad y salud humana.

Finalmente, investigaciones actuales han incorporado técnicas de aprendizaje automático para optimizar la detección y predicción de aerosoles a partir de imágenes satelitales multiespectrales, integrando además parámetros meteorológicos y de emisión (Oleniacz et al., 2023; Manavi et al., 2025).

2.6 Modelo HYSPLIT

El modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) es una herramienta integral utilizada para calcular trayectorias del aire y llevar a cabo complejas simulaciones de transporte, dispersión, transformación química y deposición de masa de aire. Ampliamente adoptado en la comunidad científica de ciencias atmosféricas, HYSPLIT se aplica en el análisis de trayectorias para identificar el origen de masas de aire y establecer relaciones entre fuentes y receptores de contaminantes (Stein et al., 2015). Además, se ha empleado en diversas simulaciones, como la predicción de la dispersión de materiales radiactivos, el seguimiento del humo de incendios forestales, la evaluación de la dispersión de polvo transportado por el viento y la estimación de concentraciones de contaminantes de diversas fuentes. La metodología computacional de HYSPLIT combina enfoques Lagrangianos y Eulerianos, lo que ha permitido su evolución durante más de 30 años, desde el cálculo de trayectorias simples basadas en radiosondas hasta la modelización del transporte y dispersión de múltiples contaminantes a diferentes escalas espaciotemporales (HYSPLIT, 2017).

El modelo se alimenta de campos meteorológicos tridimensionales que describen la dinámica atmosférica, provenientes de bases de datos globales como el *Global Data Assimilation System* (GDAS) y el *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Estos conjuntos de datos proporcionan información tridimensional sobre viento, temperatura, humedad y presión, variables que determinan la trayectoria y dispersión de las masas de aire. La resolución espacial y temporal de estos campos, junto con la adecuada representación de la estructura vertical de la atmósfera, condicionan la precisión de las trayectorias calculadas. En particular, las simulaciones tienden a ser más inciertas cerca de la superficie, donde los gradientes de viento y temperatura son más pronunciados, y más precisas en niveles altos de la atmósfera. (Draxler & Hess, 1998)

El modelo HYSPLIT puede ejecutarse tanto en modo directo (forward) como inverso (backward), lo que permite analizar la dispersión desde una fuente de emisión o bien identificar el origen de una masa de aire observada. Esta versatilidad ha consolidado a HYSPLIT como una de las herramientas más utilizadas para el estudio del transporte y dispersión de aerosoles, cenizas volcánicas y contaminantes atmosféricos a escala regional y global (Rolph et al., 2017).

2.7 GEOS-5 como Herramienta de Modelación para el Análisis del Impacto de Incendios Forestales

El visualizador Earth Nullschool ofrece una interfaz gráfica interactiva que permite visualizar variables meteorológicas y atmosféricas en tiempo real, pero no genera sus propios datos: funciona como una plataforma que compila salidas de modelos numéricos operativos (Nullschool, 2025). Dentro de estos, uno de los más relevantes para el estudio del transporte de aerosoles es el modelo GEOS-5 (Goddard Earth Observing System, versión 5), desarrollado por la NASA para simular procesos atmosféricos, incluidos los ciclos de aerosoles y contaminantes.

A diferencia de modelos como el Global Forecast System (GFS), enfocado principalmente en predicción meteorológica, el GEOS-5 incorpora módulos específicos para la representación de partículas como PM₁₀ y PM_{2.5}, lo cual lo hace particularmente adecuado para evaluar emisiones generadas por incendios forestales. Este modelo integra observaciones satelitales y datos *in situ* mediante técnicas de asimilación que aumentan su precisión en la estimación de concentraciones superficiales de aerosoles (Rienecker et al., 2011).

El sistema GEOS-5 forma parte del programa de modelación y asimilación de datos del Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de la NASA. Su arquitectura combina el modelo de circulación general atmosférica con el módulo químico-aerosol GOCART (Goddard Chemistry, Aerosol, Radiation and Transport), encargado de representar los principales tipos de aerosoles —polvo mineral, sulfatos, carbono orgánico y negro, y aerosoles marinos—, así como sus procesos de emisión, transporte y deposición (Chin et al., 2009).

GEOS-5 utiliza un esquema de asimilación de datos tridimensional (DAS) que integra información proveniente de sensores satelitales como MODIS, MISR y OMI para ajustar las concentraciones simuladas a observaciones reales. Esta característica mejora la estimación de variables como la profundidad óptica de aerosoles (AOD) y las concentraciones de PM_{2.5} en superficie (Buchard et al., 2017).

La resolución típica de los productos atmosféricos de GEOS-5 es de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ en la malla horizontal y más de 70 niveles verticales (Molod et al., 2015), lo que le permite describir la estructura tridimensional de la atmósfera y el transporte global de aerosoles. Si bien esta resolución es adecuada para estudios de escala regional y planetaria, puede limitar la comparación directa con observaciones locales debido al promedio espacial de las celdas.

La fiabilidad del GEOS-5 ha sido respaldada por estudios que lo han comparado con observaciones de campo y satelitales, mostrando buen desempeño en la simulación de aerosoles en distintos entornos geográficos (Buchard et al., 2017). Estas validaciones han demostrado que el modelo reproduce de manera consistente la magnitud y dirección del transporte de partículas, incluso a grandes distancias. Además, se ha utilizado con éxito para identificar plumas de humo transcontinentales y su impacto en la calidad del aire en áreas remotas (Liu et al., 2011).

2.8 Deposición de LAPs y Derretimiento Acelerado de la Nieve

La acumulación de LAPs, como el black carbon, en superficies nevadas reduce el albedo de la nieve, lo que incrementa la absorción de radiación solar y acelera su derretimiento. Esta alteración en el balance energético de la criósfera tiene efectos notables en las regiones montañosas donde el deshielo constituye una fuente crucial de agua (Hadley & Kirchstetter, 2012).

Flanner et al. (2007) mostraron como el black carbon altera la dinámica climática regional y global producto de su deposición en superficies nevadas, intensificando el calentamiento en áreas de altas latitud. La deposición de estas partículas es importante en el forzamiento climático contemporáneo, particularmente en áreas sensibles al cambio climático. Tal es el caso de Nueva Zelanda donde se emplearon observaciones satelitales para demostrar que los incendios forestales australianos de 2019–2020 depositaron LAPs sobre más del 90 % de sus glaciares meridionales, reduciendo el albedo promedio en $0,08 \pm 0,03$ y aumentando la tasa de fusión en 0,41 cm/día durante el verano austral (Qin et al., 2021).

En los Andes, la llegada de LAPs provenientes de incendios forestales y fuentes antropogénicas ha generado preocupación debido a su contribución al derretimiento acelerado de los glaciares y su retroceso en volumen (Cereceda et al., 2020). Este fenómeno presenta un riesgo para la estabilidad del suministro de agua proveniente de los deshielos en el ciclo hidrológico (Ulloa, 2020).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar el transporte de los aerosoles generados por el incendio ocurrido en Australia (2019 – 2020), que atravesaron el Océano Pacífico hasta llegar a las regiones de Valparaíso y Metropolitana de Santiago, Chile, considerando fechas, trayectoria y el cambio en la calidad del aire que provoca su llegada.

3.2 Objetivos específicos

OE1: Identificar fechas, rutas y tipo de eventos relevantes ocurridos durante el mega incendio de Australia y el transporte de los aerosoles desde Australia hasta Chile.

OE2: Analizar el transporte de aerosoles desde los incendios en Australia hasta Valparaíso, evaluando su travesía y llegada a la región.

OE3: Realizar una comparación entre los datos obtenidos de modelo GEOS-5 asociado a la recopilación de earthnullschool y los datos de terreno para la calidad del aire.

4 Metodología

4.1 Identificación de Fechas y Eventos Importantes

Para lograr el objetivo específico 1 (OE1), se realizaron las siguientes actividades relacionadas a ese objetivo.

- Revisión Sistemática de Literatura Académica

En esta actividad, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica relacionada con estudios previos sobre el transporte de aerosoles, su concentración y estudios meteorológicos durante la fecha de los eventos de los mega incendios de Australia (septiembre 2019 – febrero 2020). Esto proporcionó una base de conocimiento sólida para contextualizar y comprender los eventos estudiados.

- Selección de Sensores Remotos

En esta actividad, se seleccionaron sensores remotos adecuados para medir aerosoles y analizar su transporte durante el mega incendio. Se consideraron plataformas como CALIPSO (sensor satelital LIDAR), GIOVANNI (herramienta web de análisis de datos satelitales de NASA) y Earthnullschool (visor interactivo que presenta salidas de modelos atmosféricos como GEOS-5). Esta selección se basa en la capacidad de los sensores para proporcionar datos relevantes sobre la concentración y la distribución de aerosoles, así como sus patrones de movimiento y dirección.

- Definición de la Zona Geográfica

Se definió la zona geográfica de estudio que abarca la región entre Australia y Chile, permitiendo así evaluar el transporte de aerosoles. Esta definición se basa en consideraciones climáticas, meteorológicas y geográficas específicas que influyen el transporte de aerosoles en esta región.

- Selección de Aerosoles de Interés

El aerosol de interés en el monitoreo de este estudio corresponde a las partículas $PM_{2.5}$, esto debido a que es la forma en que se cuantifican las partículas de tamaño menor a $2.5 \mu m$. Además la composición química está conformada por una mezcla compleja de sales inorgánicas solubles en agua (por ejemplo, sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), y amonio (NH_4^+)), polvo mineral insoluble (por ejemplo, sulfato de calcio ($CaSO_4$) y calcio carbonato ($CaCO_3$)), oligoelementos de origen antropogénico (p. ej., Pb, Cd y Ni) y natural (p. ej., Si, Al, Fe, Ca y Mn), partículas orgánicas biogénicas (p. ej., polen, esporas y plantas). fragmentos), y material carbonoso (que incluye solubles e insolubles en agua compuestos orgánicos más carbono elemental) (Putaud et al., 2010).

- Observaciones satelitales y visualización de datos atmosféricos

Durante esta actividad, se analizaron imágenes del satélite CALIPSO, que proporciona perfiles verticales de aerosoles mediante tecnología lidar. Estas observaciones se complementaron con visualizaciones de la plataforma Earthnullschool, la cual muestra variables atmosféricas como concentración de $PM_{2.5}$, CO y SO_2 , obtenidas de modelos numéricos globales como GEOS-5. El uso conjunto de ambas herramientas permitió identificar plumas de humo generadas por los incendios en Australia y seguir su desplazamiento sobre el océano Pacífico.

- Recopilación de Datos de Estaciones de Monitoreo

Se recopilaron datos diarios de aerosoles medidos en las estaciones de monitoreo SINCA (<https://sinca.mma.gob.cl>) antes, durante y después de las fechas de arribo de los aerosoles atmosféricos observados en la sección 4.1.5. Estos datos de terreno fueron fundamentales para la comparación y asociación con los datos de sensores remotos.

- Fechas de Eventos Importantes

La herramienta Earthnullschool se empleó para identificar las fechas clave relacionadas con el transporte de humo generado por los incendios en Australia. El parámetro utilizado para el seguimiento fue la

concentración de partículas finas PM_{2.5}. El período de análisis abarcó desde el 14 de diciembre de 2019 hasta el 1 de marzo de 2020 (ver Tabla 1), considerando el verano austral.

Para cada evento, se establecieron dos momentos principales:

- i. Fecha de formación de la pluma de humo en Australia (cuando se observa alta concentración de PM_{2.5} sobre la zona de incendios).
- ii. Fecha estimada de llegada a Chile, específicamente a las regiones de Valparaíso y Metropolitana, a partir de la observación de concentraciones elevadas en el área y correlación con patrones de viento.

Tabla 1. Fechas de formación y llegada estimada de plumas de humo desde Australia a Chile durante el verano 2019–2020.

Evento	Fecha de formación en Australia	Fecha estimada de llegada a Chile	Descripción breve
1	19 de diciembre de 2019	27 de diciembre de 2019	Primera pluma densa de humo se forma y cruza el Pacífico.
2	4 y 8 de enero de 2020	16 de enero de 2020	Dos plumas se combinan en trayectoria hacia Sudamérica.
3	6 de febrero de 2020	14 de febrero de 2020	Nueva pluma alcanza zona andina central.
4	20 de febrero de 2020	28 de febrero de 2020	Último evento observado con concentración visible en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de visualización en Earthnullschool.

Estas fechas fueron utilizadas como puntos de referencia para el análisis posterior de retro trayectorias (HYSPLIT) y comparación con datos locales de calidad del aire, con el fin de validar la llegada de los aerosoles provenientes de los incendios australianos.

4.2 Análisis del Transporte de los Aerosoles Desde Australia Hasta la Región de Estudio

Para cumplir el objetivo específico 2 (OE2) se proponen las siguientes actividades:

- **Recolección de Datos de CALIPSO**

Se recolectaron datos de CALIPSO sobre la altura y el tipo de aerosoles antes, durante y después del evento en la región de andes centrales de Chile. Estos datos proporcionaron información crucial sobre la dispersión de aerosoles en la atmósfera.

- **Determinación de Retro trayectoria y Dispersión**

Se utilizó el modelo HYSPLIT (<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>) para determinar la retro trayectoria y dispersión de los aerosoles. Esto permitió evaluar la velocidad y dirección del transporte de aerosoles desde Australia hasta los Andes centrales de Chile, a través de simulaciones realizadas a distintas alturas y espacios temporales.

- **Análisis comparativo entre estaciones**

Con el fin de evaluar si las estaciones de Viña del Mar (zona costera) y Las Condes (zona de montaña) reflejan el mismo evento de transporte de aerosoles, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA). Este análisis estadístico permitió determinar si existían diferencias significativas en las concentraciones de PM_{2.5} registradas en ambas estaciones durante los eventos de llegada del humo. El análisis se realizó considerando un nivel de significancia de 0,05.

- Verificación de eventos mediante HYSPLIT y CALIPSO

Para la validez de los eventos, estos se analizaron mediante el tipo de aerosol el cual llega a la zona de estudio y la retrotrayectoria que tuvieron. Para esto primero se hizo el uso del satélite CALIPSO, este sensor remoto arroja como resultado el tipo de aerosol y la altura a la cual se encuentran, de este modo se busca la presencia de humo correspondiente a la quema de biomasa. Por otro lado, se examinó el origen de las plumas de humos con el propósito de comprender desde donde y el cómo se desplazaron a lo largo del periodo de estudio mediante el uso del modelo HYSPLIT, el cual nos entrega las rutas de masas de aire que transportaron las partículas al en el área de estudio.

4.3 Comparación de datos del modelo con datos medidos en terreno

Para cumplir el objetivo específico 3 (OE3) se proponen las siguientes actividades:

- Extracción y organización de datos modelados y observacionales

Se recopilaron datos de concentraciones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) a partir del modelo GEOS-5 visualizado en el sitio earth.nullschool.net, seleccionando valores para tres momentos temporales clave: tres horas antes del peak de concentración, durante el peak, y tres horas después del peak. Paralelamente, se extrajeron datos medidos por las estaciones de monitoreo del sistema SINCA, en los mismos tiempos y ubicaciones (zona costera y zona de montaña de la región de estudio).

- Comparación de Concentraciones de Aerosoles

Se realizó la comparación directa de las concentraciones de $PM_{2.5}$ entregadas por el modelo y las medidas por las estaciones en terreno para los cuatro eventos seleccionados. Este análisis permitió identificar el comportamiento temporal de los aerosoles en cada evento, observando los aumentos y descensos de concentración asociados al paso de las nubes de humo provenientes de Australia.

- Evaluación de concordancia y limitaciones

Finalmente, se evaluó la concordancia general entre los datos modelados y los observados, destacando tanto las coincidencias en los patrones temporales como las diferencias en los valores absolutos. Se identificaron limitaciones importantes, como la baja cobertura espacial del sistema SINCA (solo dos estaciones disponibles) y las posibles diferencias de resolución entre el modelo y las mediciones locales.

5 Resultados

5.1 Identificación y Caracterización de los Eventos Importantes

La exhaustiva revisión bibliográfica realizada no solo amplió sustancialmente la perspectiva sobre el tema de estudio, sino que también permitió contextualizar y fundamentar sólidamente el enfoque adoptado para alcanzar el objetivo general. Como resultado de este análisis crítico, se identificaron y sintetizaron los siguientes puntos clave:

Tabla 2. Estudios claves identificados sobre transporte de aerosoles durante el evento Black Summer (2019–2020)

Estudio	Zona de observación	Herramientas utilizadas	Principales hallazgos
Ohneiser et al. (2020)	Punta Arenas, Chile	CALIPSO, LIDAR	Detectaron pluma de humo en la estratósfera (10–25 km) llegada el 10 de enero de 2020.
Simmons et al. (2022)	Australia	COALA, espectrometría, sensores químicos	Caracterización química del humo; detección de compuestos tóxicos y aerosoles carbonáceos.

Qin et al. (2021)	Nueva Zelanda	MODIS, CALIOP	Evidenciaron depósito de LAPs sobre glaciares y reducción del albedo en más del 8 %.
Torres et al. (2020)	Canadá (caso comparativo)	CALIPSO, OMPS, HYSPLIT	Validaron el transporte estratosférico de aerosoles hasta zonas distantes vía modelos.

Fuente: Elaboración propia

Esta revisión entregó un contexto sólido sobre la magnitud del fenómeno, confirmando que los aerosoles generados en Australia pueden recorrer largas distancias, alcanzar alturas estratosféricas y afectar regiones tan alejadas como Sudamérica o Nueva Zelanda. Además, permitió definir criterios de observación y selección de herramientas para el seguimiento del transporte atmosférico en el presente estudio.

Se utiliza la herramienta Earthnullschool para monitorear las plumas de humos generados por el mega incendio australiano, la cual proporciona información sobre la concentración de diversos aerosoles, como las partículas PM, el SO_4^{2-} y los componentes de la química atmosférica, como el CO, CO_2 , SO_2 y NO_2 . Estos datos son recopilados de diferentes sensores remotos, que incluyen el Goddard Earth Observing System (GEOS-5), la Oficina de Modelado y Asimilación Global (GMAO) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), y el Sistema de Monitoreo Atmosférico Copernicus (CAM5), entre otros. Además, Earthnullschool muestra las corrientes de viento a nivel de superficie, por lo que facilita analizar la dispersión y transporte en el monitoreo de los aerosoles.

Zona Geográfica y Aerosol de Interés (Material Particulado Fino)

La definición de la zona geográfica en estudio consta de dos partes, la primera es a gran escala del hemisferio sur, para poder monitorear de buena manera los humos provenientes de las quemaduras del megaincendio australiano y la segunda parte corresponde a las regiones de Valparaíso y Metropolitana de Santiago en los Andes centrales de Chile, esta es utilizada para poder tener monitoreo sobre la calidad del aire en el objetivo específico número 2. La zona macro viene delimitada tomando la zona del país australiano hasta Chile, por todo el hemisferio sur (Figura 5), mientras que en la Figura 6 muestra a las regiones de Valparaíso y Metropolitana de Santiago en Chile donde se analiza los eventuales arribos de las plumas de humo asociados a las megaquemaduras producidas en Australia.

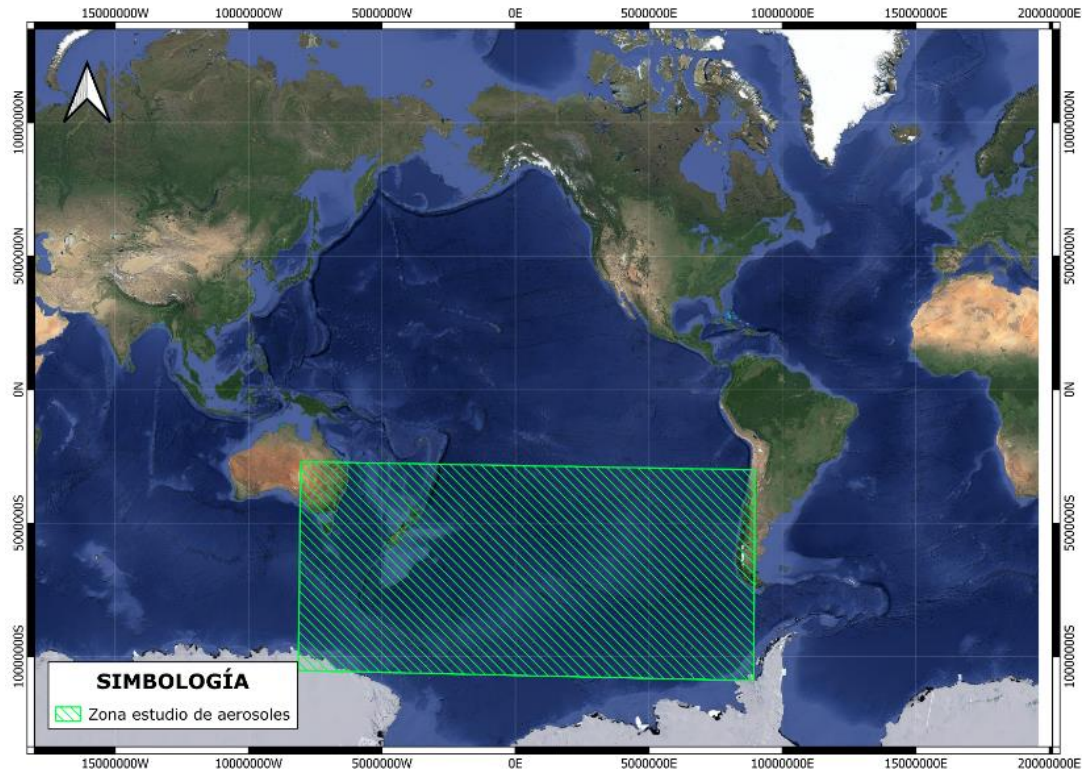


Figura 5. Zona macro de estudio hemisferio sur entre Australia y Chile.

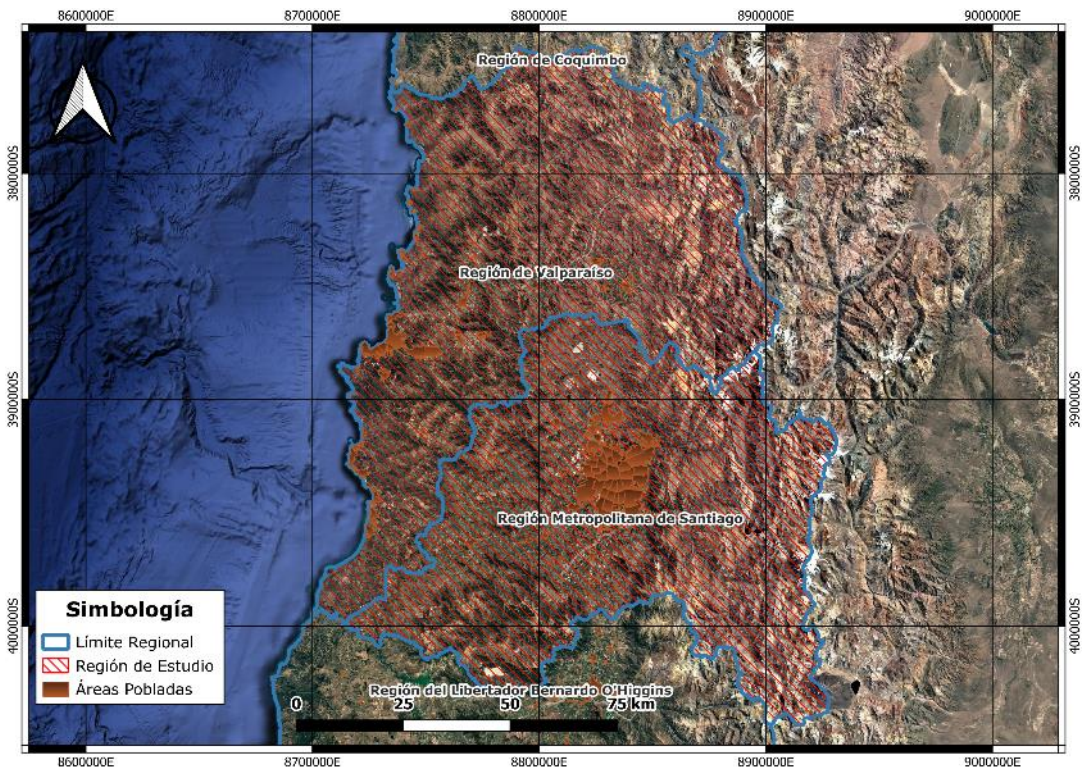


Figura 6. Zona de estudio 2 regiones de Valparaíso y Metropolitana de Santiago, Chile. Fuente: Elaboración propia.

En este estudio se ha seleccionado el material particulado fino ($PM_{2.5}$) como aerosol objetivo, este es definido a modo de partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 2.5 micrómetros. Estas partículas son uno de los principales componentes del humo generado por incendios forestales y presentan una alta relevancia tanto ambiental como sanitaria debido a su capacidad para

mantenerse en la atmósfera durante largos periodos y ser transportadas a grandes distancias (Johnston et al., 2012).

Desde el punto de vista de su composición química, el PM_{2.5} liberado durante incendios forestales está conformado por una mezcla compleja que incluye material carbonoso (como carbono negro y materia orgánica), sales inorgánicas (como sulfatos, nitratos y amonio), polvo mineral (como silicatos y carbonatos), y trazas de metales tanto de origen natural como antropogénico (Putaud et al., 2010). Esta diversidad de componentes contribuye a sus efectos sobre el clima, especialmente por su interacción con la radiación solar (Bond et al., 2013), y sobre la salud humana, al penetrar profundamente en los pulmones y desencadenar enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Morgan et al., 2010).

Debido a su tamaño reducido y capacidad de transporte atmosférico, el PM_{2.5} puede atravesar continentes. En el caso del presente estudio, estas partículas se originaron en los incendios del “Black Summer” en Australia y fueron transportadas por las corrientes atmosféricas hacia los Andes centrales de Chile. La selección del PM_{2.5} como variable central de análisis se basa en su amplia disponibilidad en bases de datos tanto satelitales (como GEOS-5 visualizado en Earth Nullschool) como terrestres (mediciones de la red SINCA), lo que permite realizar una comparación robusta entre ambas fuentes para evaluar la llegada de aerosoles al país y sus potenciales impactos locales.

Fechas de Eventos Importantes

La herramienta Earthnullschool se emplea para identificar las fechas de eventos clave en el transporte de los humos australianos. El período de estudio se inicia el 14 de diciembre de 2019 y concluye el 1 de marzo de 2020. Esta elección de fechas se basa en los primeros indicios de la llegada del humo al sector de Punta Arenas, que se registraron el 10 de enero (Ohneiser et al., 2020). El parámetro con el que se realiza el monitoreo de la pluma de humo que llega a Suramérica corresponde a las partículas PM_{2.5}. A continuación, se detallan las fechas de los eventos importantes en la Tabla 3:

Tabla 3. Fechas de eventos importantes en la zona geográfica definida por partículas PM_{2.5}.

Evento	Descripción
Primer Evento	Comienza la formación de una alta concentración de una pluma de humo de PM _{2.5} producto de los incendios en Australia el 19 de diciembre de 2019, la cual al pasar los días comienza a crecer y desplazarse. Luego el 27 de diciembre de 2019 se observa su llegada a la región de estudio.
Segundo Evento	Comienza la formación de una alta concentración de una pluma de humo de PM _{2.5} producto de los incendios en Australia el 4 de enero, posterior a esta fecha se observa la salida de otra pluma el 8 de enero de 2020, la cual al pasar los días comienza a mezclarse con la pluma anterior el 13 de enero de 2020, para luego desplazarse y el 16 de enero de 2020 tiene su llegada a la región de estudio.
Tercer Evento	Comienza la formación de una alta concentración de una pluma de humo de PM _{2.5} producto de los incendios en Australia el 6 de febrero, la cual se desplaza a través de los días para llegar el 14 de febrero de 2020 a la región de estudio.
Cuarto Evento	Comienza la formación de una alta concentración de una pluma de humo de PM _{2.5} producto de los incendios en Australia el 20 de febrero de 2020, la cual al pasar los días comienza a crecer y desplazarse. Luego el 28 de febrero de 2020 se observa su llegada a la región de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Análisis del Transporte de los Aerosoles Desde Australia Hasta la Región de Estudio

Datos de Estaciones SINCA y Relación con los Humos Australianos

Las estaciones de calidad del aire entregan una diversidad de variables con sus respectivas mediciones, por lo que el primer filtro para poder elegir estaciones es el tipo de variable la cual está midiendo, para efectos de este estudio se están analizando los aerosoles más finos disponibles en la red SINCA como es el $PM_{2.5}$, por lo que las estaciones a interés deben medir estas partículas. El segundo filtro es la fecha de medición, debido a que no todas las estaciones se encuentran operando durante el tiempo en que ocurre el evento.

Las estaciones seleccionadas corresponden a la estación de Viña del Mar (código 05109) que se localiza en el borde costero a 0 m.s.n.m. en la Región de Valparaíso, y de Las Condes (código 13114) en localizado en 793 msnm en la Región Metropolitana, donde corresponden a la sección de la costa y de la montaña respectivamente, esto para poder notar los peaks de mediciones que existen en el rango de fechas seleccionadas, ya que pueden significar el paso de una nube de humo en la zona. La Figura 7 muestra la ubicación de las estaciones seleccionadas para la medición de datos y la Tabla 4 las coordenadas de cada estación.

Tabla 4. Coordenadas estaciones de calidad del aire.

Estación	Región	Latitud	Longitud
Las Condes	Metropolitana	-33,38	-70,52
Viña del Mar	Valparaíso	-33,02	-71,55

Fuente: Elaboración propia.

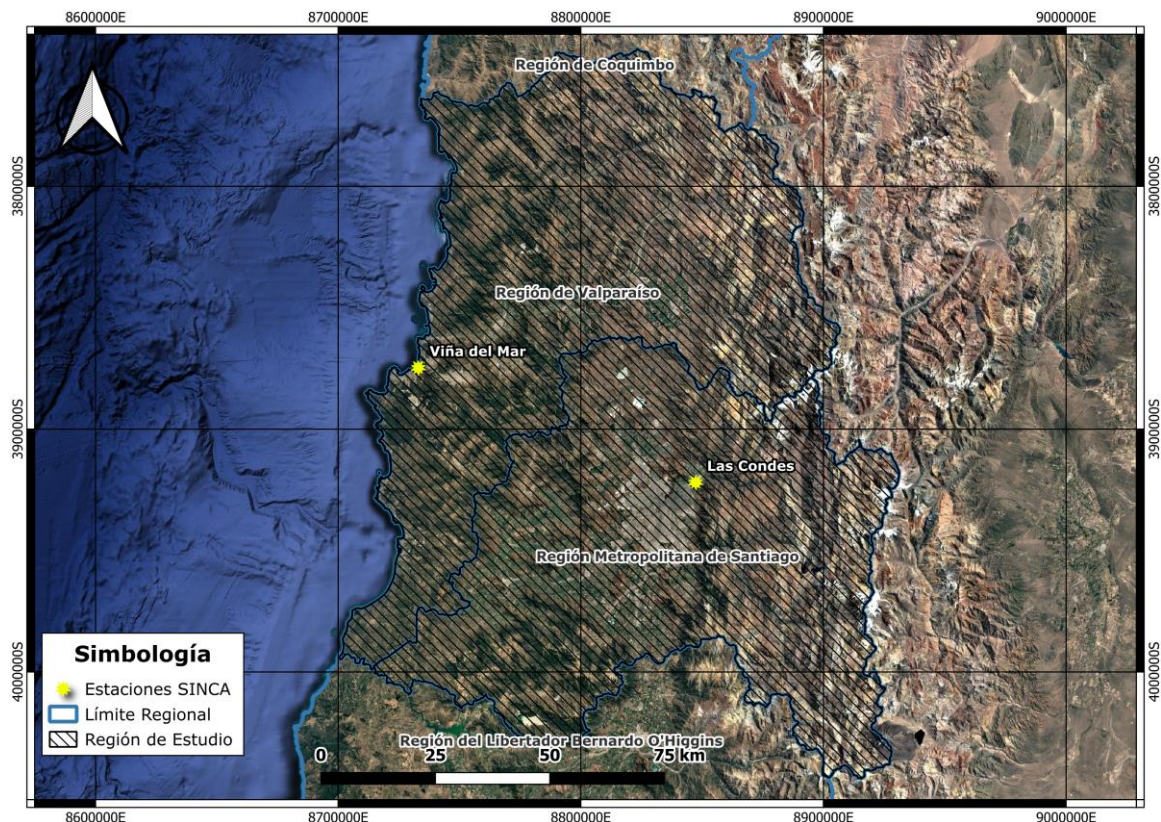


Figura 7. Ubicación de las estaciones seleccionadas para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Se encontraron varias mediciones que presentan un valor peak en la costa (Viña del Mar) y pasado un tiempo en la montaña (Las Condes). Por ende, para identificar los peaks que pueden corresponder a una pasada de humo australiana se toma de ayuda la herramienta de earthnullschool con el monitoreo de las

nubes con concentración de $PM_{2.5}$ salientes de Australia y las fechas observadas de la sección 0. En total se encontraron 4 eventos descritos en la Tabla 5 y presentados gráficamente en las figuras de a continuación (ver Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15).

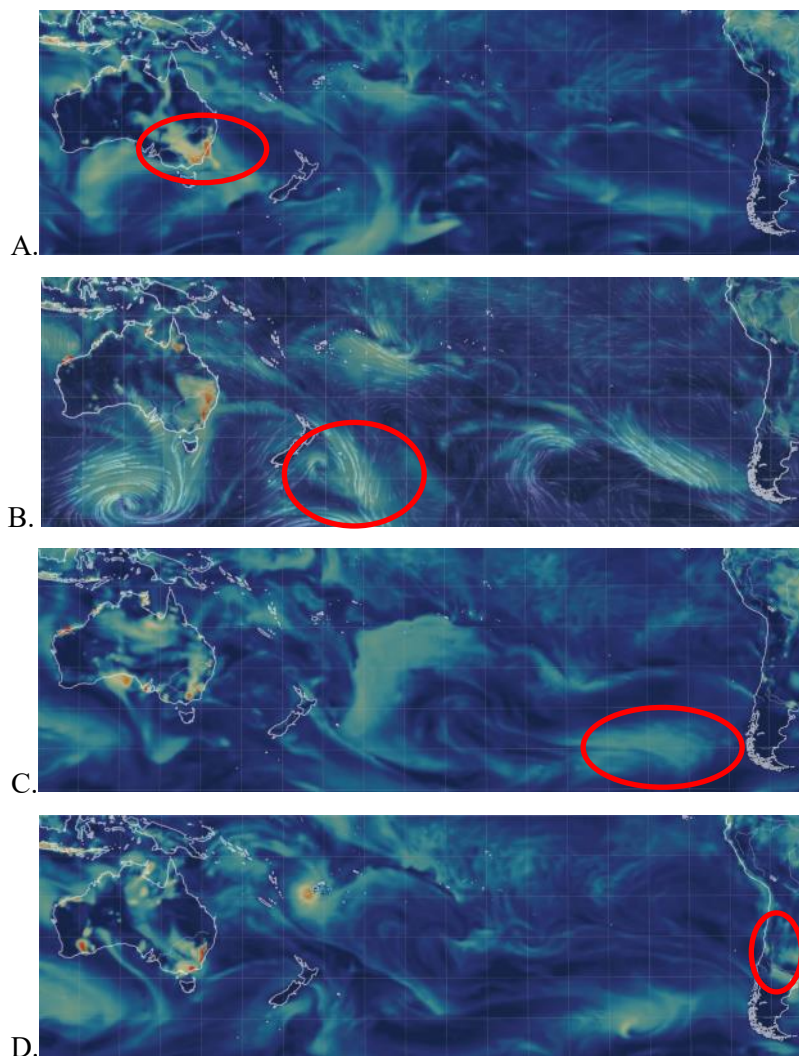


Figura 8. Secuencia primer evento encontrado. A) 18 de diciembre, 2019. B) 20 de diciembre, 2019
C) 24 de diciembre, 2019. y D) 27 de diciembre, 2019 Fuente: <https://earth.nullschool.net>.

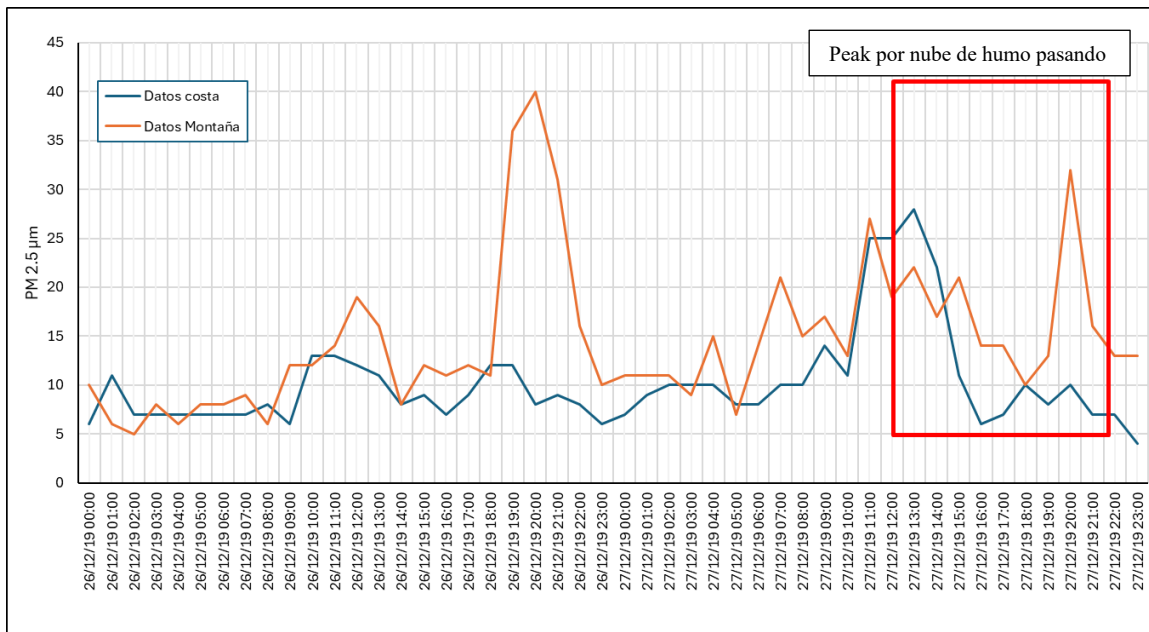


Figura 9. Medición de concentración $PM_{2.5}$ en las estaciones de calidad del aire SINCA en Viña del Mar (Datos costa) y Las Condes (Datos Montaña) durante el primer evento. Fuente: Elaboración propia.

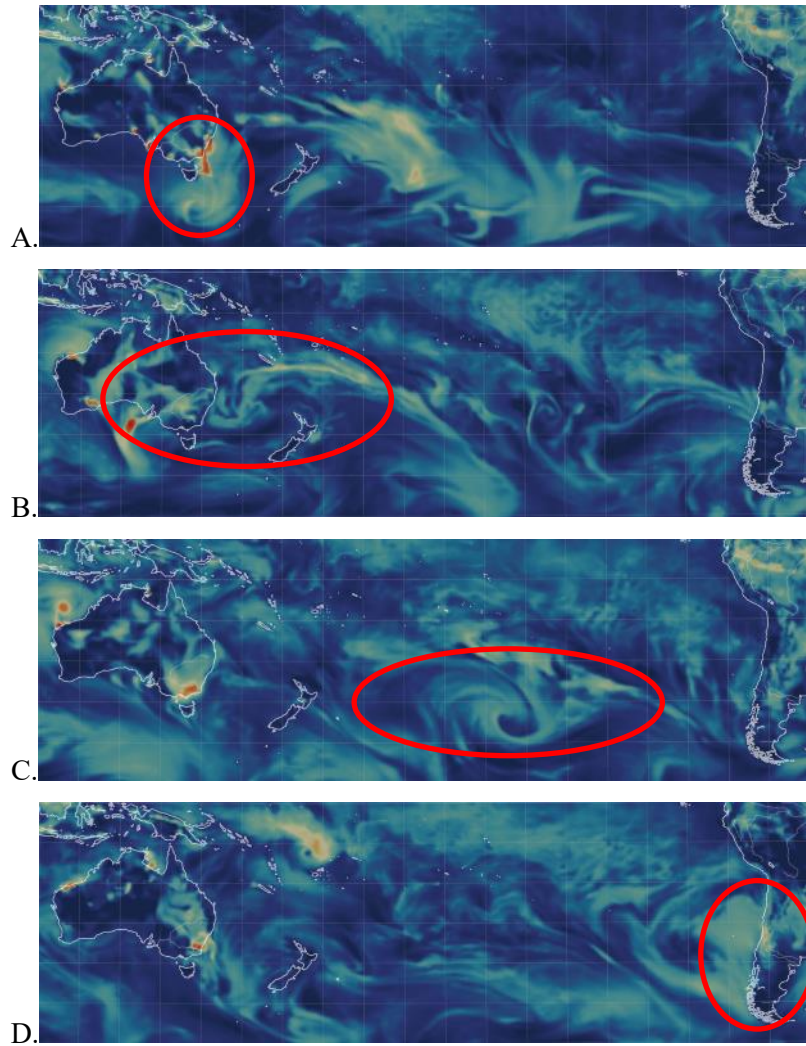


Figura 10. Secuencia segundo evento. A) 4 de enero, 2020. B) 8 de enero, 2020 C) 13 de enero, 2020. y D) 16 de enero, 2020. Fuente: <https://earth.nullschool.net>.

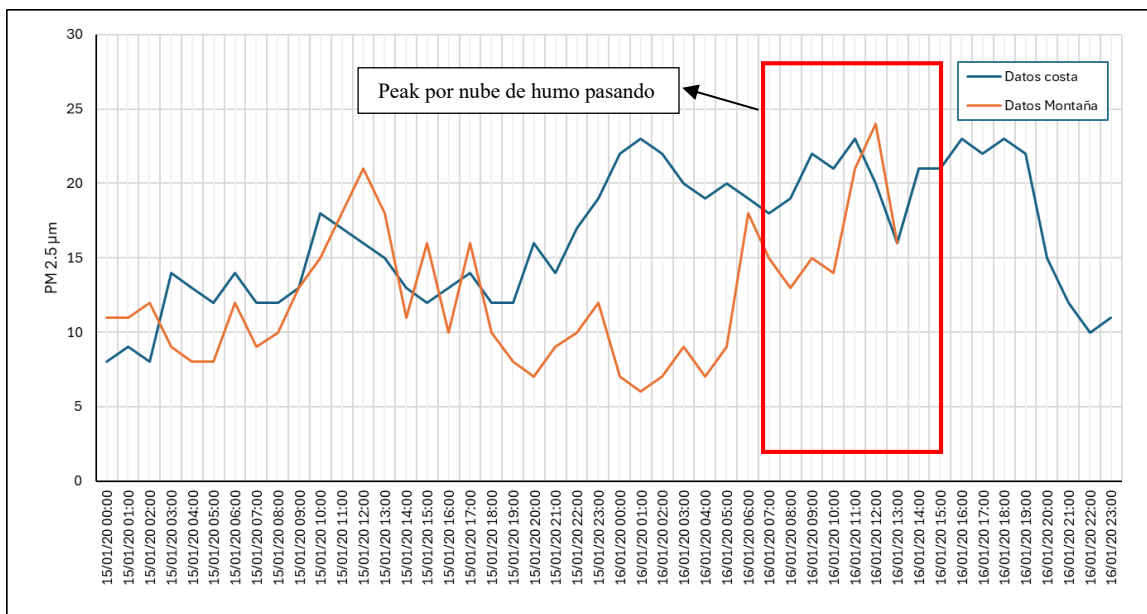


Figura 11. Medición de concentración PM_{2.5} en las estaciones de calidad del aire SINCA en Viña del Mar (Datos costa) y Las Condes (Datos Montaña) durante el segundo evento. Fuente: Elaboración propia.

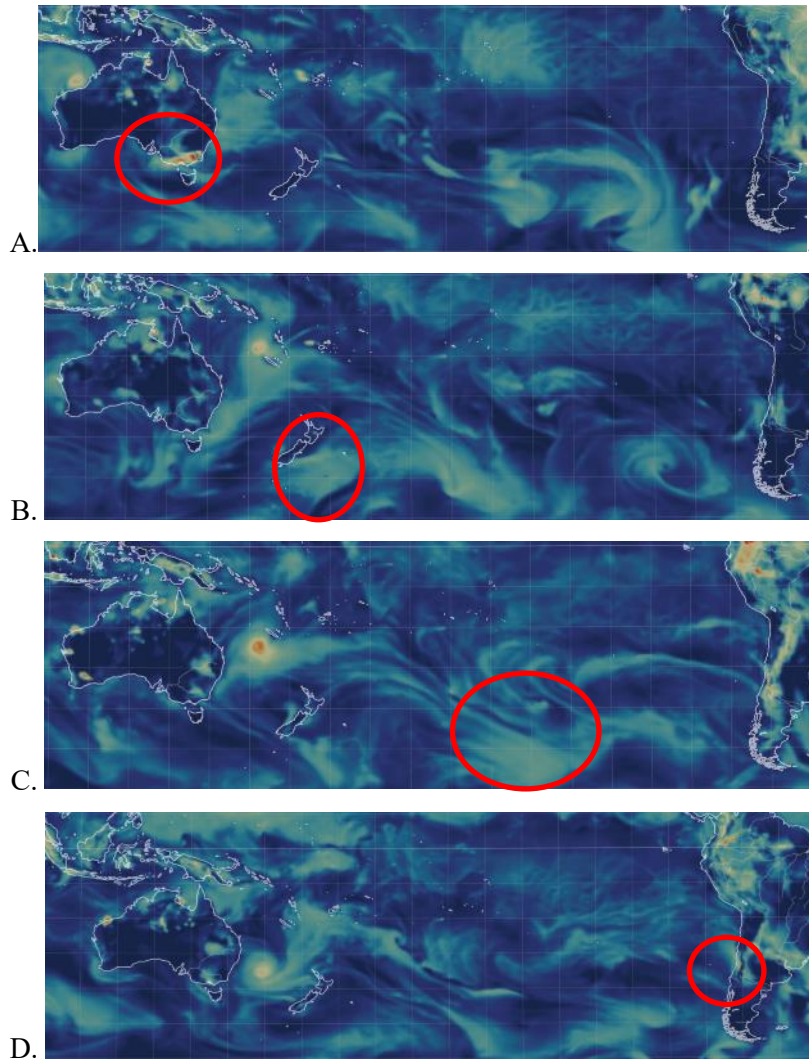


Figura 12. Secuencia tercer evento: A) 6 de febrero, 2020. B) 10 de febrero, 2020. C) 12 de febrero, 2020 y D) 14 de febrero, 2020. Fuente: <https://earth.nullschool.net>

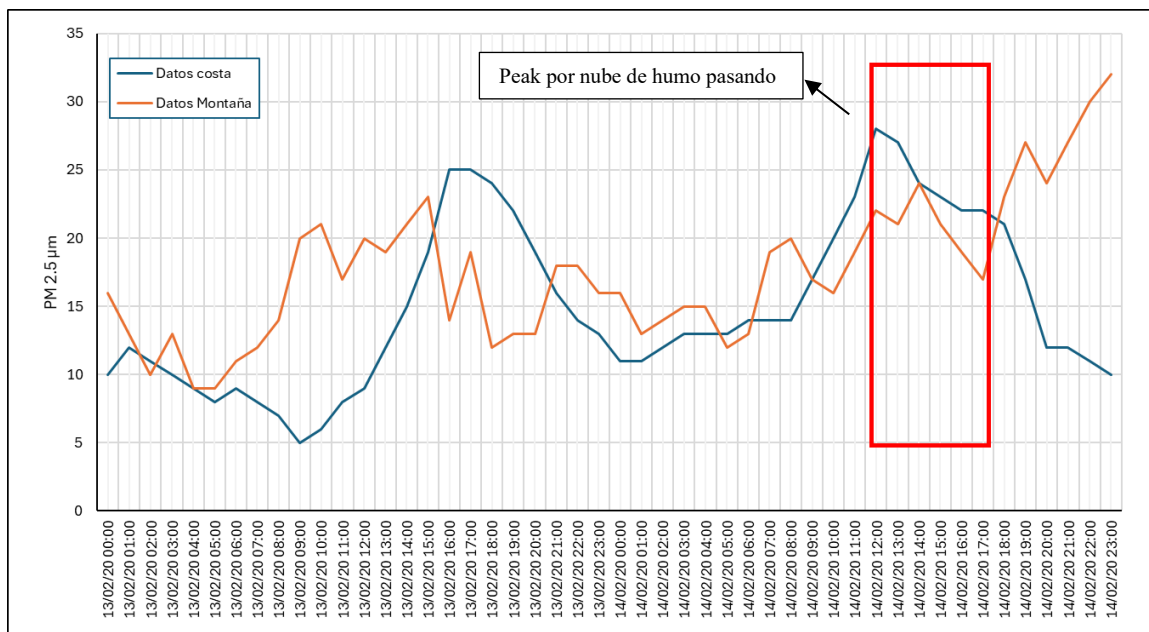


Figura 13. Medición de concentración PM_{2.5} en las estaciones de calidad del aire SINCA en Viña del Mar (Datos costa) y Las Condes (Datos Montaña) durante el tercer evento. Fuente: Elaboración Propia.

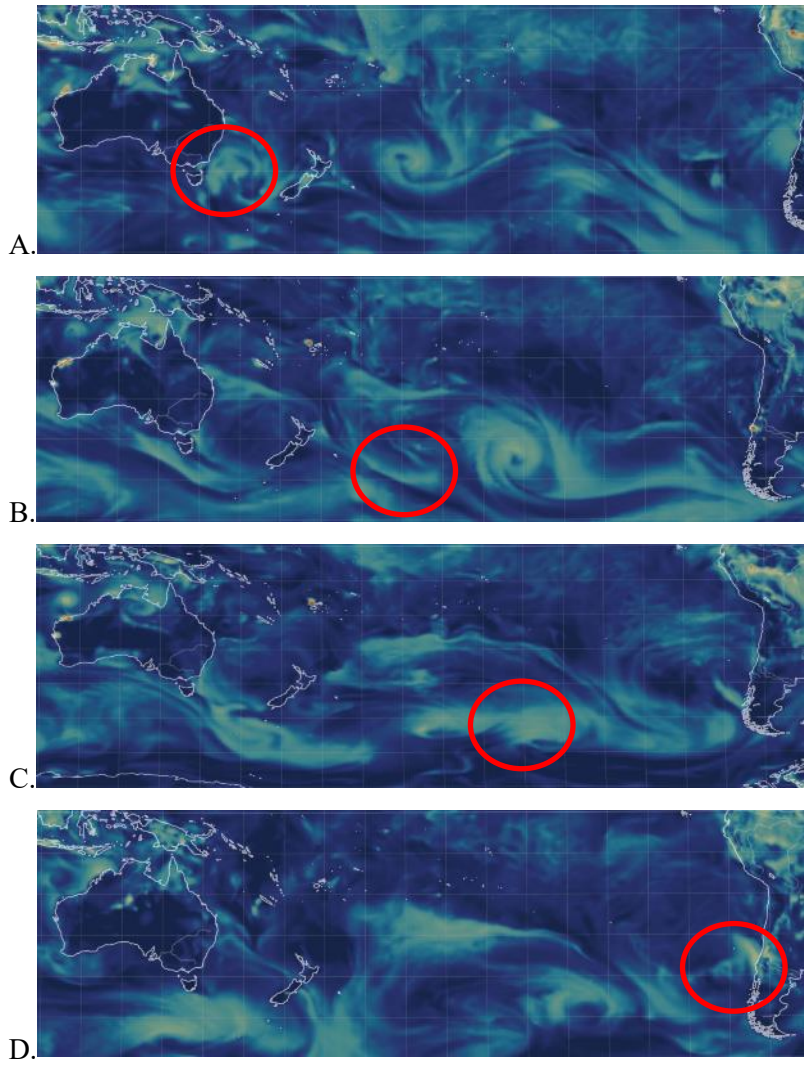


Figura 14. Secuencia cuarto evento: A) 20 de febrero, 2020. B) 23 de febrero, 2020. C) 25 de febrero, 2020 y D) 28 de febrero, 2020. Fuente: <https://earth.nullschool.net>

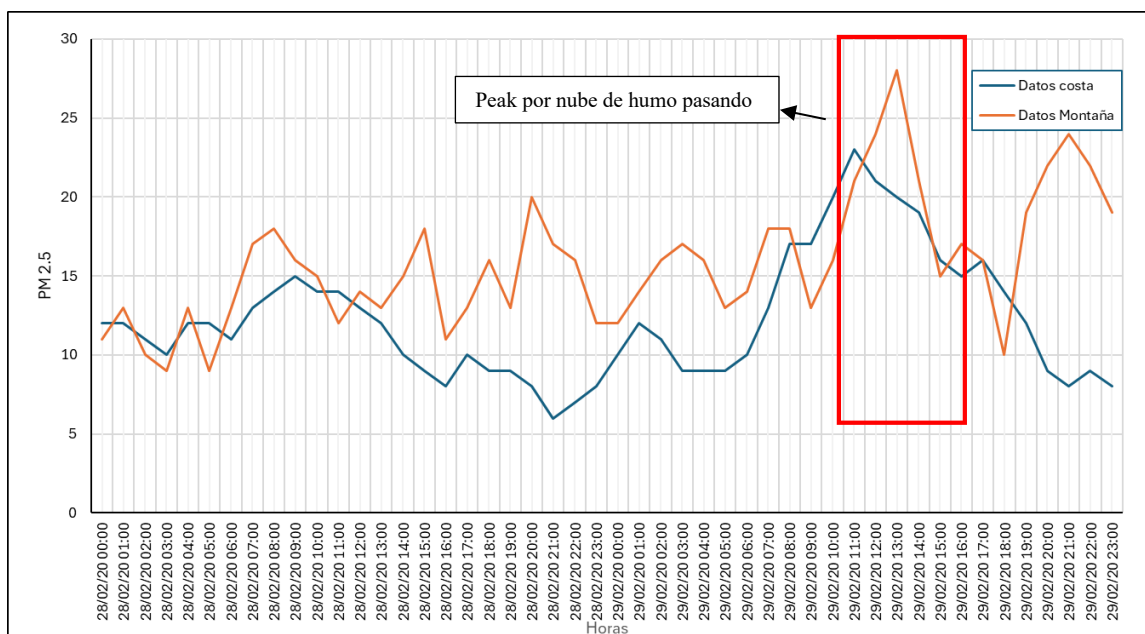


Figura 15. Medición de concentración $PM_{2.5}$ en las estaciones de calidad del aire SINCA en Viña del Mar (Datos costa) y Las Condes (Datos Montaña) durante el cuarto evento. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Fecha de los eventos que resumen las fechas iniciales y finales de cada uno de los 4 eventos descritos

Fecha formación Australia	Fecha llegada a Chile	Figuras asociadas
19 de diciembre, 2019	27 de diciembre, 2019	Figura 8-Figura 9
4 y 8 de enero, 2020	16 de enero, 2020	Figura 10 -Figura 11
6 de febrero, 2020	14 de febrero, 2020	Figura 12-Figura 13
20 de febrero, 2020	28 de febrero, 2020	Figura 14-Figura 15

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se le realizó un análisis de varianza para comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas en las estaciones de Viña del Mar y Las Condes. El valor p que se obtuvo de este análisis fue de 0,37, mayor al nivel de significancia 0,05. Esto indica que no hay diferencias significativas entre las concentraciones medidas en ambas estaciones, por lo que se puede interpretar que ambos lugares reflejan el mismo evento de transporte de $PM_{2.5}$, es decir, la misma pluma de humo, indicando que el humo producto de los incendios afectaron de manera uniforme tanto la costa como las montañas y proceden de la misma fuente.

Verificación de Datos Mediante HYSPLIT y CALIPSO

Durante este estudio, la órbita del satélite CALIPSO cubrió el evento del 14 de febrero de 2020 de los encontrados en la sección anterior, mientras para los tres restantes se encontró para el día anterior con una localización distinta pero cercana, esta corresponde al Océano Pacífico, sector aledaño a la zona de estudio. Esta decisión es tomada ya que la órbita del satélite de CALIPSO no pasó el mismo día de estos tres eventos, siendo esto lo más cercano al seguimiento y el cual fue visto en el monitoreo realizado por earthnullschool. Las siguientes figuras (Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19) corresponden a los datos observados en el satélite CALIPSO, donde lo delimitado por el rectángulo rojo corresponde a la zona de interés.

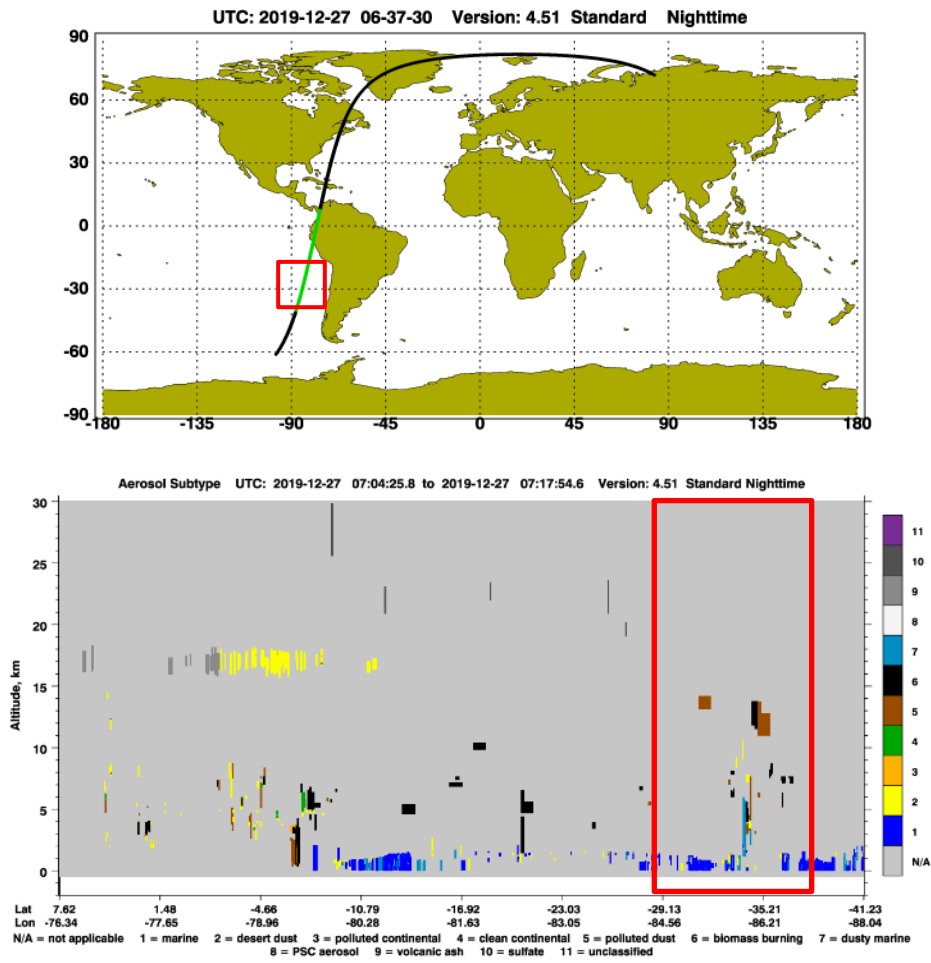


Figura 16. Distribución de aerosoles en altura, 26 de diciembre de 2019 (evento 1). El aerosol de interés corresponde al color negro (número 6) que indica la presencia de aerosoles de quema de biomasa entre 5 y 14 km de altura. Recuadro rojo corresponde al área en estudio. Fuente: CALIPSO, 2024.

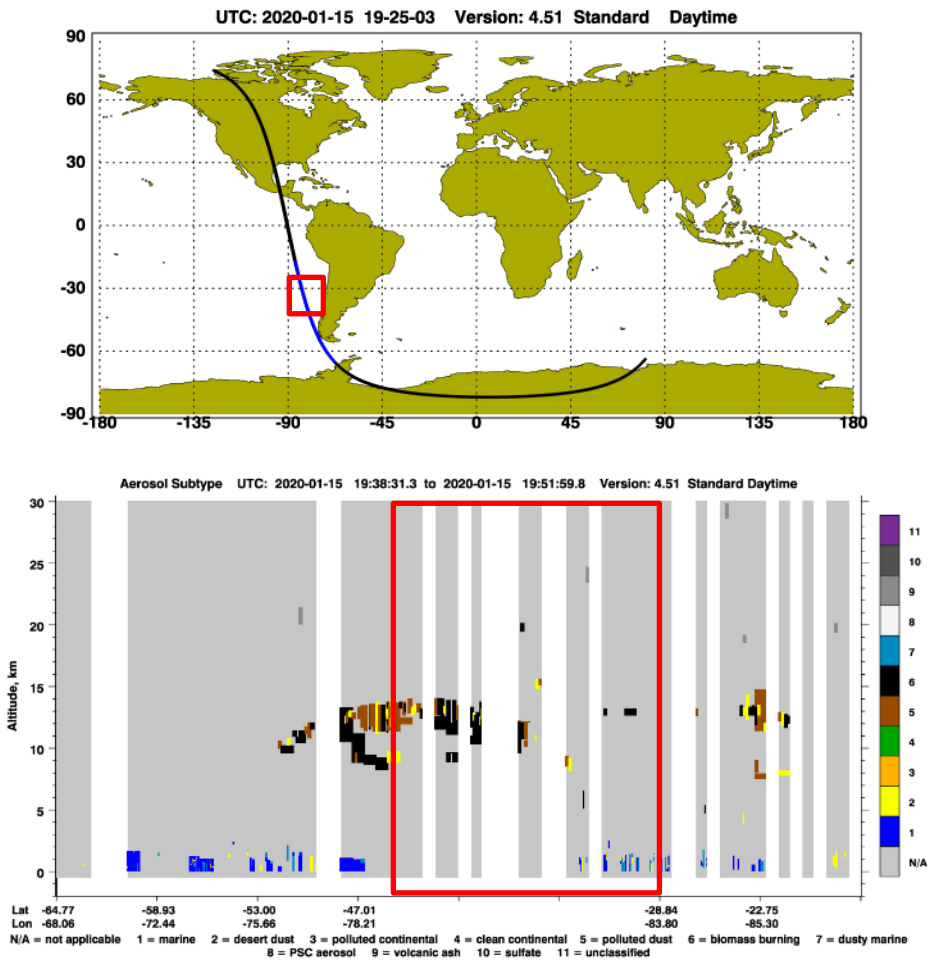


Figura 17. Distribución de aerosoles en altura, 15 de enero de 2020 (evento 2). El aerosol de interés corresponde al color negro (número 6) que corresponde a aerosoles de quema de biomasa localizados a una altura entre 8 y 14 km de altura. Recuadro rojo corresponde al área en estudio. Fuente: CALIPSO, 2024.

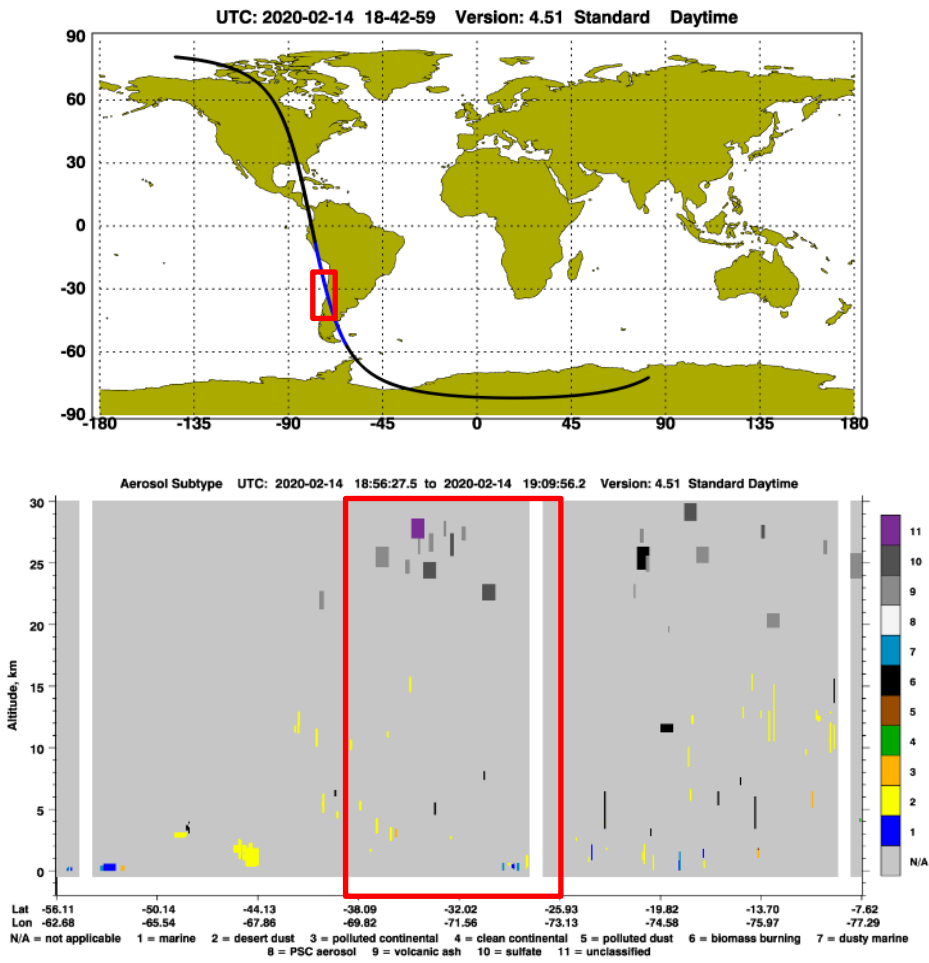


Figura 18. Distribución de aerosoles en altura, 14 de febrero de 2020 (evento 3). El aerosol de interés Quema de Biomasa corresponde al color negro (Num 6). Recuadro rojo corresponde al área en estudio. Fuente: CALIPSO, 2024.

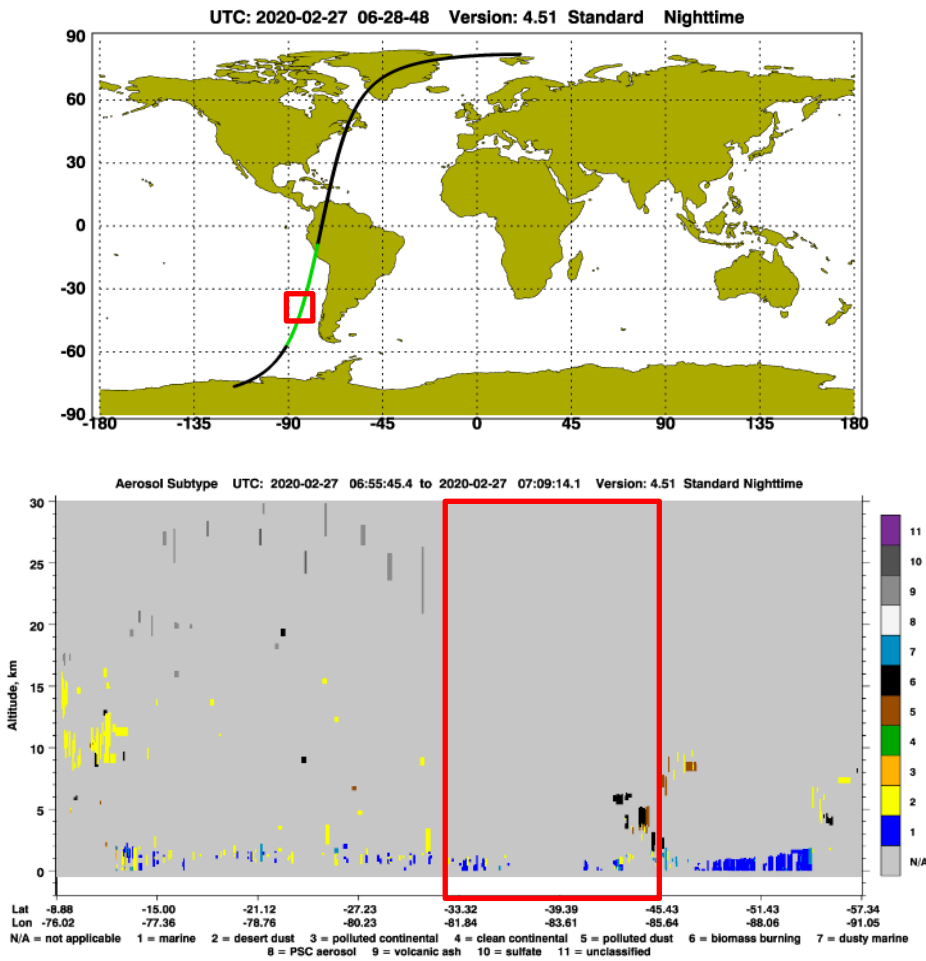


Figura 19. Distribución de aerosoles en altura, 27 de febrero de 2020 (evento 4). El aerosol de interés Quema de Biomasa corresponde al color negro (número 6). Recuadro rojo corresponde al área en estudio. Fuente: CALIPSO, 2024.

De acuerdo con las observaciones obtenidas mediante el satélite CALIPSO (Figura 16 a Figura 19), se identificó la presencia de aerosoles de quema de biomasa a diferentes alturas en los días de los eventos analizados. Estas capas se detectaron en distintos niveles de la atmósfera, reflejando tanto variaciones como similitudes entre los episodios. La Tabla 6 sintetiza las alturas en las que se observaron los aerosoles de interés junto con el evento correspondiente.

Tabla 6. Alturas con aerosol de quema biomasa identificados.

Evento	Altura con presencia de aerosoles de interés (km)
27 de diciembre 2019	4,0 a 8,0 – 10,0 a 13,0
16 de enero 2020	5,0 – 9,0 a 13,0
14 de febrero 2020	5,0 – 7,0
28 de febrero 2020	5,0

Para establecer las rutas de retro trayectorias de los vientos desde Australia hasta los Andes centrales de Chile, se utilizó el modelo HYSPLIT, donde se estableció como punto representativo a la estación de calidad del aire seleccionada en la costa, ya que esta corresponde a la región de estudio y sus coordenadas utilizadas se encuentran en la Tabla 4. Además, se establece como dato de entrada para la altura los

datos de la Tabla 6 debido a que el objetivo es conocer la procedencia de estos aerosoles producto de la quema de biomasa, y si estos provienen de Australia.

Finalmente, para respaldar los datos obtenidos con HYSPLIT, se extrae una imagen ráster del sensor remoto Suomi NPP/OMPS (Torres, 2019) perteneciente al día de origen de las retrotrayectorias calculadas. La imagen extraída corresponde al promedio diario de aerosoles provenientes de tormentas de arena o humo producto de la quema de biomasa, el sector de estas concentraciones pertenece a la troposfera baja en un rango de alturas equivalente a 1-3 km. Una característica para considerar en las concentraciones otorgadas en este sensor remoto es que si la concentración se encuentra entre 5 y 10 corresponde a un humo denso el cual puede alcanzar mayores alturas en la troposfera. Las siguientes figuras ilustran algunos de los resultados obtenidos (ver Figuras Figura 20Figura 21Figura 22 Figura 23), los cuales son las fechas de los eventos encontrados en 0.

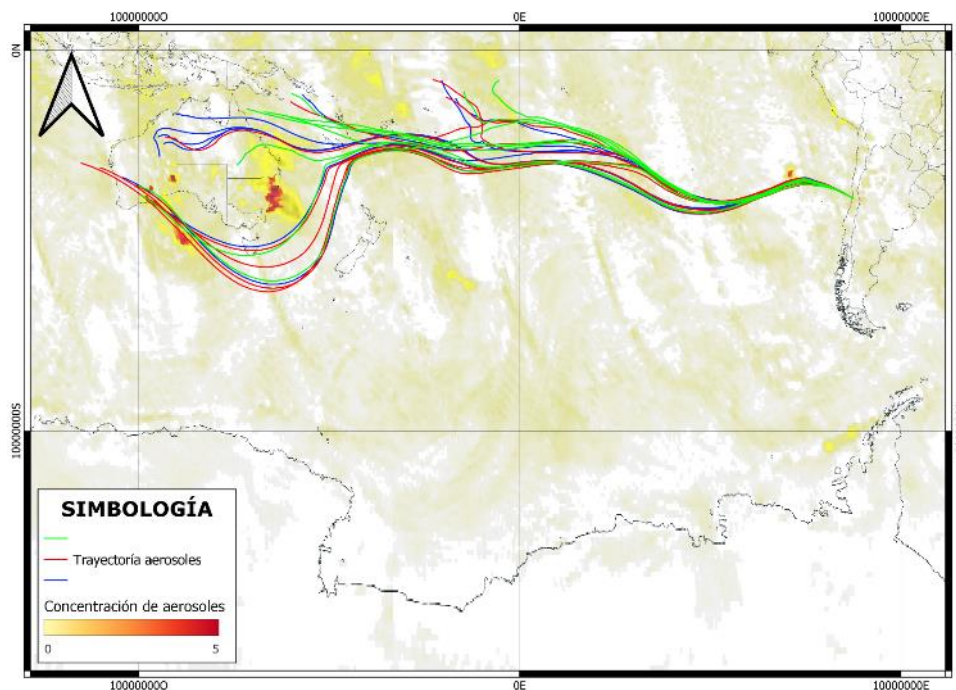


Figura 20. Datos obtenidos en HYSPLIT para el evento del 27 de diciembre de 2019 (evento 1).

Fuente: Adaptación de HYSPLIT y Suomi NPP/OMPS.

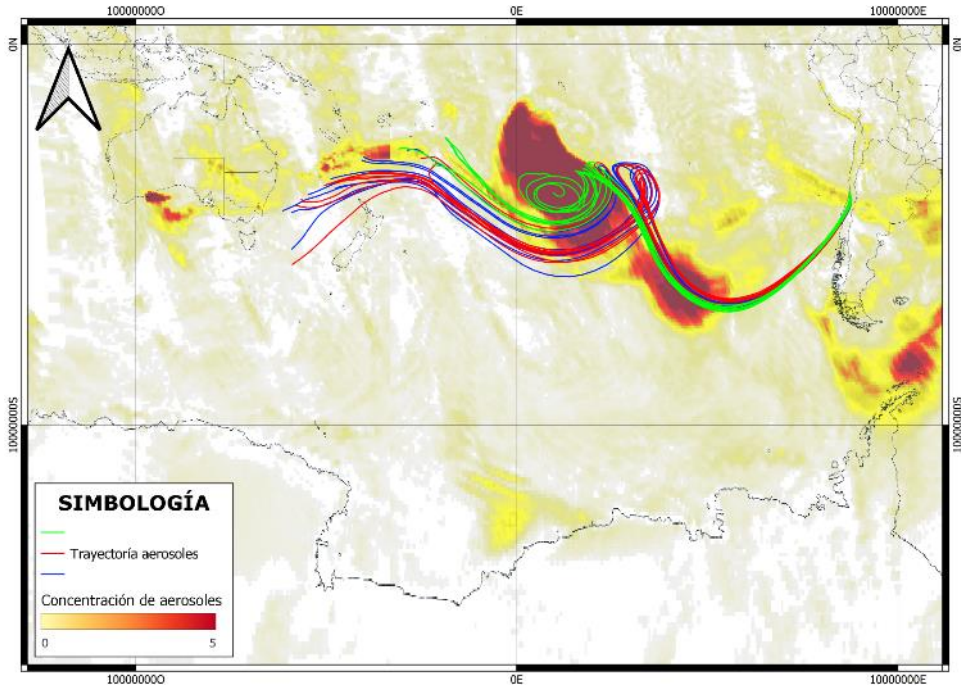


Figura 21. Datos obtenidos en HYSPLIT para el evento del 16 de enero de 2020 (evento 2).

Fuente: Adaptación de HYSPLIT y Suomi NPP/OMPS.

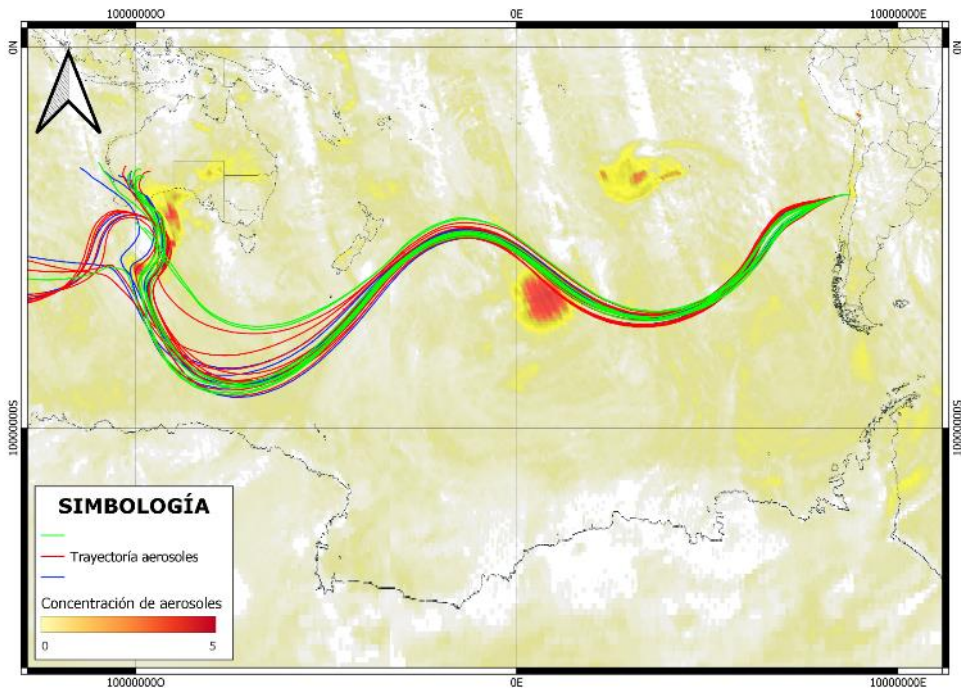


Figura 22. Datos obtenidos en HYSPLIT para el evento del 14 de febrero de 2020 (evento 3).

Fuente: Adaptación de HYSPLIT y Suomi NPP/OMPS.

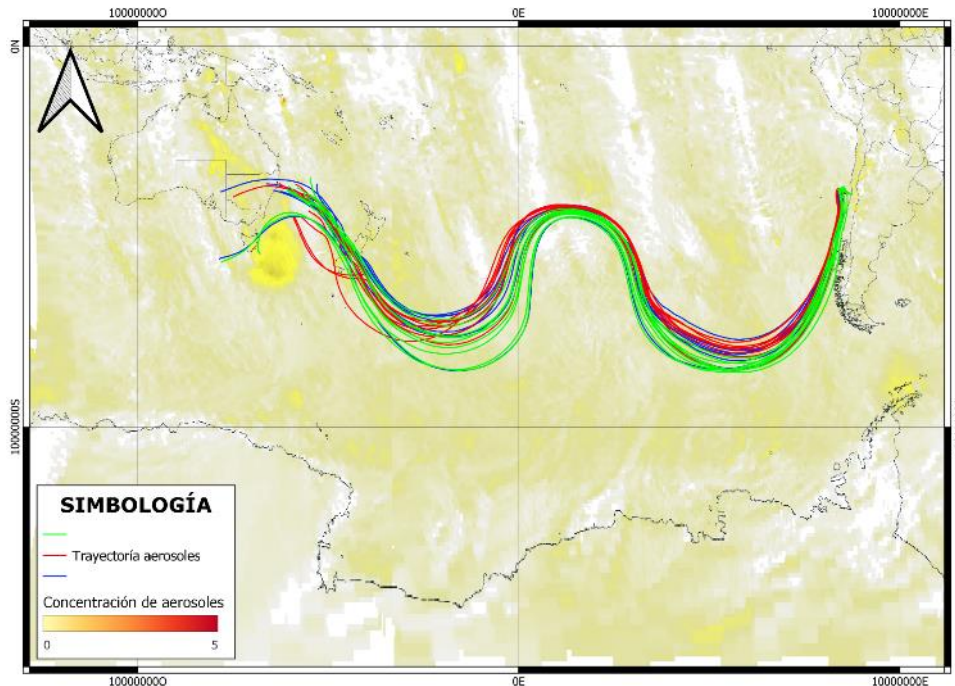


Figura 23. Datos obtenidos en HYSPLIT para el evento del 27 de febrero de 2020 (evento 4).

Fuente: Adaptación de HYSPLIT y Suomi NPP/OMPS.

Las Figuras Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23 muestran que para los cuatro eventos ocurridos, se observa que las plumas de humo de aerosoles principalmente provienen de las concentraciones que son producto de los incendios australianos en el periodo estudiado, estos contaminantes llegan a la región de estudio en un periodo de 8 días desde que comienzan su formación en Australia y se desplazan a lo largo del hemisferio sur.

En el primer evento se observa que los humos provienen directamente de las concentraciones ubicadas en Australia; de modo similar, en el cuarto evento (27 de febrero de 2020) las trayectorias se asocian al humo situado sobre el océano Pacífico adyacente al país, producto de las quemas registradas en esa fecha. En el segundo evento, una fracción importante de los aerosoles proviene de masas de aire próximas a Australia, localizadas sobre el océano Pacífico. Para el tercer evento, el origen se vincula a una acumulación de aerosoles en el océano Pacífico entre Nueva Zelanda y Chile, correspondiente a una pluma persistente generada el 4 de enero de 2020 que se fue desplazando hacia el este (ver Figura 10). Finalmente, en el cuarto evento se identifica que una parte de los aerosoles que llegan a la región proviene directamente de Australia, mientras que otra fracción procede desde un área más alejada, fuera de la zona de estudio, aunque dentro del mismo hemisferio sur.

5.3 Comparación de Resultados del Modelo GEOS-5 con Datos Medidos en Terreno

Para realizar la comparación entre datos modelados y medidos, se consultaron concentraciones estimadas de $PM_{2.5}$ en la plataforma Earthnullschool, basada en el modelo atmosférico GEOS-5. Se seleccionaron ubicaciones geográficas cercanas a las estaciones SINCA de Viña del Mar (zona costera) y Las Condes (zona de montaña), y se registraron visualmente los valores simulados para fechas y horarios coincidentes con los eventos analizados en la sección 0. Para cada evento, se consideraron tres momentos clave: tres horas antes del peak de concentración superficial, durante el peak y tres horas después. Este procedimiento permitió observar la evolución temporal de los aerosoles simulados por el modelo y preparó la base para su comparación con los datos locales.

Simultáneamente, se recopilieron los registros horarios de $PM_{2.5}$ medidos en las estaciones de monitoreo de la red SINCA, enfocándose en las mismas franjas horarias definidas para cada evento. Esto permitió

estructurar un análisis paralelo entre ambos conjuntos de datos, asegurando la coherencia temporal necesaria para evaluar su concordancia.

Comparación Temporal con Estaciones SINCA

La Tabla 7 presenta los resultados obtenidos a partir de la comparación entre las concentraciones simuladas por el modelo GEOS-5 y los valores medidos por las estaciones SINCA. Se observa un patrón general de aumento y disminución en ambos conjuntos de datos, correspondiente al paso de las plumas de humo por la zona central de Chile. Este comportamiento fue consistente en tres de los cuatro eventos analizados, especialmente durante el horario del peak.

En el evento del 16 de enero de 2020 no se identificó una coincidencia clara entre ambos registros, lo que podría deberse a condiciones atmosféricas locales no representadas por el modelo, o bien a vacíos en los datos de terreno. En contraste, el evento del 14 de febrero mostró una correspondencia destacable entre el modelo y las mediciones en superficie, tanto en la magnitud como en la sincronía del peak. En general, estos resultados permiten validar el uso complementario de GEOS-5 como herramienta para caracterizar el transporte de aerosoles, reconociendo sus limitaciones a escala local.

Tabla 7. Comparación de concentraciones PM_{2.5} entre la estación y el modelo GEOS-5 en μm^3 .

Evento	Lugar	GEOS-5 (3 horas antes del peak)	Estación (3 horas antes del peak)	GEOS-5 (durante el peak)	Estación (durante el peak)	GEOS-5 (3 horas después del peak)	Estación (3 horas después del peak)
Primer evento (27 de diciembre, 2019)	Montaña	46	11	21	21	18	10
	Costa	16	19	20	28	8	6
Segundo evento (16 de enero, 2020)	Montaña	23	15	29	24	46	No hay dato
	Costa	11	19	25	23	27	21
Tercer evento (14 de febrero, 2020)	Montaña	8	19	25	24	22	17
	Costa	3	17	22	28	15	23
Cuarto evento (28 de febrero, 2020)	Montaña	18	16	27	28	23	17
	Costa	6	17	16	23	8	19

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de Concordancia y Limitaciones

Si bien se identificaron diferencias en los valores absolutos de concentración entre el modelo GEOS-5 y las estaciones SINCA, estas discrepancias pueden atribuirse a la resolución espacial del modelo (visualizado mediante Earthnullschool) y a la naturaleza estimativa de sus datos. GEOS-5 no entrega mediciones directas, sino simulaciones generadas mediante un sistema de asimilación que integra observaciones satelitales y datos meteorológicos para representar el comportamiento atmosférico a gran escala. En contraste, las estaciones SINCA reportan mediciones puntuales en superficie, por lo que ambas fuentes operan sobre escalas distintas. Además, la baja densidad de estaciones en la zona de estudio limita la validación espacial directa del modelo.

No obstante, en tres de los cuatro eventos analizados se observó una coincidencia razonable en los patrones temporales de concentración de PM_{2.5}, lo que respalda el uso del modelo GEOS-5 como herramienta complementaria para caracterizar eventos de transporte de aerosoles a nivel regional. Esta utilidad se ve reforzada al integrarse con otras fuentes de información, como los productos satelitales CALIPSO y Suomi, y las simulaciones de trayectoria generadas con el modelo HYSPLIT, que en conjunto aportan evidencia del transporte transoceánico de plumas de humo desde Australia. Así, la combinación de modelos, observaciones satelitales y registros en terreno permite una comprensión más robusta del fenómeno, a pesar de las limitaciones propias de cada fuente de datos.

6 Discusión

El presente estudio permitió identificar el transporte transoceánico de aerosoles generados por los mega incendios australianos de 2019–2020, conocidos como “Black Summer”, hacia la zona central de Chile. Este fenómeno se observó en cuatro eventos principales, con una diferencia temporal de aproximadamente una semana entre la formación de las plumas y su llegada a la región, coherente con investigaciones previas como Ohneiser et al. (2020), quienes observaron la llegada de humo australiano en la estratósfera sobre Punta Arenas. Las retrotrayectorias calculadas mediante el modelo HYSPLIT evidenciaron rutas compatibles con lo reportado en la literatura y confirmaron que estos aerosoles se desplazaron a través del Pacífico impulsados por patrones de circulación atmosférica propios del hemisferio sur (Torres et al., 2020; De Laat et al., 2012). Este resultado destaca la relevancia de incorporar el análisis de fuentes remotas en evaluaciones de calidad del aire a nivel regional, especialmente en un contexto de intensificación de eventos extremos.

Desde una perspectiva vertical, el uso del satélite CALIPSO permitió caracterizar la altura a la cual se encontraron aerosoles de quema de biomasa durante los eventos analizados. Según los datos extraídos, estos se localizaron principalmente entre 5 y 14 km de altitud en la zona de interés. Paralelamente, se observaron incrementos de PM_{2.5} en superficie en las estaciones SINCA de Viña del Mar y Las Condes. Esta coexistencia sugiere que parte del material particulado descendió hasta niveles bajos, alcanzando zonas urbanas. Este comportamiento es consistente con procesos de subsidencia o mezcla vertical reportados en la literatura (Ohneiser et al., 2020; Torres et al., 2020). Para complementar esta observación, se utilizó el modelo atmosférico GEOS-5, visualizado mediante la plataforma Earthnullschool, como herramienta de apoyo cualitativo. Este modelo integra asimilación de datos satelitales, meteorológicos y químicos para simular la evolución y transporte de aerosoles a escala global (Buchard et al., 2017). Si bien Earthnullschool no permite la descarga directa de datos y la consulta se realizó manualmente, los patrones temporales mostrados fueron coherentes con las mediciones en tres de los cuatro eventos, lo que valida su uso como recurso interpretativo en contextos con baja densidad de estaciones activas.

En términos de impactos potenciales, se plantea una hipótesis relevante sobre el rol de estos aerosoles en la criósfera andina. Aunque no se evaluó la deposición química directa, la llegada confirmada de plumas a zonas de cordillera sugiere una posible implicancia en la reducción del albedo nival. Investigaciones como las de Flanner et al. (2007) y Bond et al. (2013) han demostrado que partículas oscuras como el black carbon pueden acelerar el derretimiento de la nieve, afectando el balance hídrico. Este mismo fenómeno fue documentado en Nueva Zelanda tras los incendios australianos, con una disminución del albedo en glaciares y aumentos en la tasa de fusión (Qin et al., 2021). Dada la dependencia de la zona central de Chile de la criósfera para el abastecimiento hídrico, estos resultados representan una alerta temprana sobre vulnerabilidades ambientales emergentes. La falta de sensores ópticos o químicos en alta montaña impidió comprobar este mecanismo, lo que representa una oportunidad directa para futuras líneas de investigación interdisciplinaria.

En conjunto, esta investigación entrega evidencia concreta del transporte de aerosoles desde incendios extrarregionales hacia zonas urbanas y cordilleras de Chile, articulando múltiples líneas de observación: datos satelitales, modelación atmosférica y mediciones locales. El aporte original radica en integrar y contextualizar estas fuentes para el territorio nacional, mostrando que fenómenos de alcance global pueden tener consecuencias medibles a nivel local. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de mejorar la cobertura y resolución de los sistemas de monitoreo atmosférico en Chile, así como de incorporar este tipo de eventos en las evaluaciones de riesgo climático y en la planificación ambiental estratégica.

7 Conclusiones

El presente estudio sobre el transporte de aerosoles generados durante los incendios forestales del "Black Summer" en Australia hacia los Andes Centrales de Chile aporta evidencia sobre la dinámica atmosférica transcontinental. Mediante el uso de herramientas como el modelo HYSPLIT, el sensor remoto CALIPSO y el visualizador Earthnullschool, junto a los datos locales del sistema SINCA, se logró identificar y analizar trayectorias de aerosoles que arribaron a la región de estudio aproximadamente una semana después de su formación en Australia.

Se determinaron cuatro eventos principales de la llegada de los humos australianos a la zona central de Chile. El primero inicia el 19 de diciembre de 2019 y llegando el 27 de diciembre de 2019 al sector de estudio. Para el segundo evento, la llegada de los aerosoles ocurrió el 16 de enero de 2020, donde los humos que provienen de Australia corresponden a formaciones de días distintos, estos son el 4 y 8 de enero del 2020. Luego para el tercer evento, la formación de los humos comienza el 6 de febrero de 2020 y su llegada se produce el 14 de febrero de 2020. Finalmente, el cuarto evento ocurre con la llegada de los aerosoles formados el 20 de febrero de 2020, estos pasaron por la zona central de Chile el 27 de febrero de 2020. La identificación de estos eventos fue detectada mediante el seguimiento de las partículas $PM_{2.5}$ en el visualizador EarthNullschool, basado en el modelo GEOS-5, cuyos resultados fueron coherentes con los obtenidos posteriormente.

El análisis de los perfiles satelitales de CALIPSO mostró la presencia de aerosoles de quema de biomasa a distintas altitudes, principalmente entre 5 y 14 km. Sin embargo, la presencia de concentraciones significativas de $PM_{2.5}$ en superficie, registradas en Viña del Mar y Las Condes, refleja la coexistencia de concentraciones en altura y superficie, sin poder determinar un descenso directo de los aerosoles, lo que demuestra la influencia de estos eventos a distintas escalas en la atmósfera. Esta coexistencia de datos a distintas alturas es coherente con lo reportado en la literatura sobre transporte de humo a gran escala. Este hallazgo no solo confirma patrones previamente descritos en la literatura, sino que amplía la comprensión de la magnitud del transporte y su impacto potencial en zonas críticas como la criósfera. Posteriormente, a partir de las alturas identificadas en CALIPSO, se calcularon retrotrayectorias con HYSPLIT, obteniendo retrotrayectorias provenientes de Australia asociadas a concentraciones de aerosoles $PM_{2.5}$.

En la comparación entre las concentraciones simuladas por GEOS-5 y las mediciones de terreno, se identificó una coincidencia en tres de los cuatro eventos, validando parcialmente la capacidad del modelo para representar la evolución temporal del transporte. Las diferencias observadas en magnitud se asocian a la resolución espacial del modelo y a la escasa densidad de estaciones locales, pero los patrones generales demuestran coherencia entre las fuentes. Este resultado da cumplimiento al objetivo de comparar los datos modelados con las observaciones locales, demostrando la utilidad de integrar modelación global y monitoreo regional en el estudio de fenómenos de transporte atmosférico de larga distancia.

Si bien no se cuantificó directamente la deposición de LAPs en la nieve y los glaciares andinos, los resultados apuntan a su posible contribución al derretimiento acelerado, dado el transporte documentado hacia áreas montañosas. Esta situación es particularmente relevante considerando la dependencia hídrica de la región central de Chile en contextos de cambio climático.

El trabajo también expuso limitaciones metodológicas importantes, como la baja resolución espacial de los modelos globales utilizados, la dependencia de interpolaciones visuales y la escasa densidad de estaciones locales. Estas restricciones dificultaron realizar una validación más exhaustiva, pero al combinar distintas fuentes de datos se logró construir un análisis robusto que sienta bases para investigaciones futuras.

En síntesis, este estudio no solo confirma la llegada de aerosoles australianos a Chile, sino que también abre nuevas preguntas sobre su impacto local, especialmente sobre sistemas hídricos y ambientales

estratégicos. El aporte original de esta investigación radica en ofrecer una primera aproximación integrada del transporte transcontinental de aerosoles para el contexto chileno, combinando modelación, datos satelitales y mediciones locales, lo cual representa un paso clave para el diseño de estrategias de monitoreo, mitigación y gestión ambiental más eficaces frente a fenómenos de alcance global.

8 Agradecimientos

Esta memoria se realizó en el marco de dos proyectos de investigación: Proyecto FONDECYT de Iniciación en Investigación N.º 11220482 y Proyecto USM Interno Multidisciplinario PI_M_24_03. Agradezco especialmente al Dr. Tomás y a la Dra. Lina Castro por su guía, orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, así como por facilitar el acceso a recursos y asesoría tanto técnica como administrativa que permitieron llevar a cabo esta investigación de la mejor manera.

Agradezco profundamente a toda mi familia por su amor incondicional, comprensión y paciencia durante toda mi formación universitaria. Su apoyo ha sido fundamental para mantenerme motivado y superar las dificultades de estos años. A mis compañeros y también amigos Juan, Matías, Simón y Emilio, con quienes recorrí la mayor parte de esta carrera y siempre que necesitaba una mano, estaban ahí para darla, tanto académicamente como personal. También quiero agradecer a Gabriela, quien me acompañó en la etapa final de este proceso y cuya presencia y apoyo fueron un gran impulso para culminar esta memoria.

Finalmente, a todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente al desarrollo de este trabajo, ya sea brindando apoyo técnico, científico o emocional. Su presencia hizo posible culminar esta etapa con gratitud y orgullo.

9 Referencias

- Alvarez-Garretón, C., Boisier, J.P., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia-Jalabert, R., Zambrano-Bigiarini, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., & Garreaud, R. (2023). Seguridad Hídrica en Chile: Caracterización y Perspectivas de Futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 (ANID/FONDAP/1522A0001), 72 pp. Disponible en www.cr2.cl/seguridadhidrica
- Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955–966.
- Arrizaga, R., Clarke, D., Cubillos, P. P., & Ruiz-Tagle V., C. (2023). Wildfires and Human Health: Evidence from 15 Wildfire Seasons in Chile. <https://doi.org/10.18235/0005003>
- Bolaño-Ortiz, T. R., Allende, D., Ruggeri, M. F., Pascual Flores, R. M., Puliafito, S. E., & Lakkis, S. G. (2015). Estudio de las variaciones en el albedo de nieve y glaciares en los Andes Centrales.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380–5552.
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., ... & Zhang, X. Y. (2013). Clouds and aerosols. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 571–658). Cambridge University Press.
- Buchard, V., da Silva, A. M., Colarco, P. R., Darmenov, A., Randles, C. A., Govindaraju, R., ... & Kim, H.-C. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. *Journal of Climate*, 30(17), 6851–6872.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press.
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., & Vidal, V. (2020, March). Glacier retreat differences in Chilean Central Andes and their relation with anthropogenic black carbon pollution. In 2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS) (pp. 434-440). IEEE.
- CALIPSO: Cloud–Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation Lidar Level 2 Vertical Feature Mask data, ValStage1 V3-40, available at: <https://www-calipso.larc.nasa.gov>
- Chin, M., Diehl, T., Dubovik, O., Eck, T. F., Holben, B. N., Sinyuk, A., ... & Streets, D. G. (2009). Light absorption by pollution, dust, and biomass burning aerosols: A global model study and evaluation with AERONET measurements. *Annales Geophysicae*, 27(9), 3439–3464.
- Ciciretti, R., Barraza, F., De la Barrera, F., Urquieta, L., & Cortés, S. (2022). Relationship between wildfire smoke and children’s respiratory health in the metropolitan cities of central Chile. *Atmosphere*, 13(1), 58.
- CONAF. (2017). *Incendios Forestales Temporada 2016–2017: Lecciones y Desafíos*. Corporación Nacional Forestal, Chile.
- De Laat, A. T. J., Stein Zweers, D. C., Boers, R., & Tuinder, O. N. (2012). A solar escalator: Observational evidence of the self-lifting of smoke and aerosols by absorption of solar radiation in the February 2009 Australian Black Saturday plume. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D4).
- Di Virgilio, G., Hart, M. A., Maharaj, A. M., & Jiang, N. (2021). Air quality impacts of the 2019–2020 Black Summer wildfires on Australian schools. *Atmospheric Environment*, 261, 118450.
- Draxler, R. R., & Hess, G. D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295–308.

- Flanner, M. G., Zender, C. S., Hess, P. G., Mahowald, N. M., Painter, T. H., Ramanathan, V., & Rasch, P. J. (2009). Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(7), 2481–2497.
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11).
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote sensing of environment*, 87(2-3), 273-282.
- Hadley, O. L., & Kirchstetter, T. W. (2012). Black-carbon reduction of snow albedo. *Nature Climate Change*, 2(6), 437-440.
- HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. Recuperado de http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php
- Hoff, R. M., & Christopher, S. A. (2009). Remote sensing of particulate pollution from space: Have we reached the promised land? *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(6), 645–675.
- Ichoku, C., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., & Levy, R. (2003). MODIS observation of aerosols and estimation of aerosol radiative forcing over southern Africa during SAFARI 2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13), 8499.
- Jensen, J. R. (2006). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Johnston, F. H., Henderson, S. B., Chen, Y., Randerson, J. T., Marlier, M., DeFries, R. S., ... Brauer, M. (2012). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental Health Perspectives*, 120(5), 695–701.
- Kaiser, J. W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., ... & Morcrette, J. J. (2012). Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences*, 9(1), 527–554.
- Kuenzer, C., & Dech, S. (2013). *Thermal infrared remote sensing: Sensors, methods, applications*. Springer.
- Lai, I. C., & Brimblecombe, P. (2021). Long-range transport of air pollutants to Taiwan during the COVID-19 lockdown in Hubei Province. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(2), 200392.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Liu, Y., Goodrick, S. L., & Stanturf, J. A. (2013). Future U.S. wildfire potential trends projected using a dynamically downscaled climate change scenario. *Forest Ecology and Management*, 294, 120–135.
- Manavi, S. E., Aktypis, A., Siouti, E., Skyllakou, K., Myriokefalitakis, S., Kanakidou, M., & Pandis, S. N. (2025). Atmospheric aerosol spatial variability: Impacts on air quality and climate change. *One Earth*, 8(3).
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., & Bacmeister, J. (2015). Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*, 8(5), 1339–1356.
- Morgan, G., Sheppeard, V., Khalaj, B., Ayyar, A., Lincoln, D., Jalaludin, B., ... & Lumley, T. (2010). Effects of bushfire smoke on daily mortality and hospital admissions in Sydney, Australia. *Epidemiology*, 47-55.
- Nullschool. (2025). About Earth.nullschool.net. <https://earth.nullschool.net/about.html>

- Ohneiser, K., Ansmann, A., Baars, H., Seifert, P., Barja, B., Jimenez, C., ... & Wandinger, U. (2020). Smoke of extreme Australian bushfires observed in the stratosphere over Punta Arenas, Chile, in January 2020: optical thickness, lidar ratios, and depolarization ratios at 355 and 532 nm. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(13), 8003-8015.
- Oleniacz, R., Drzewiecki, W., Gorzelnik, T., Grzesik, K., Kozakiewicz, R., Kowalewski, Z., & Kossakowska, K. (2023). Assessment of the impact of waste fires on air quality and atmospheric aerosol optical depth: A case study in Poland. *Energy Reports*, 9, 16-38.
- Omar Torres (2019), OMPS-NPP L2 NM Aerosol Index swath orbital V2, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [diciembre 2019- febrero 2020], [10.5067/40L92G8144IV](https://doi.org/10.5067/40L92G8144IV)
- Orell Fuentes, M. I. (2020). Utilidad de modelos de pronóstico de volúmenes de deshielo en la gestión de recursos hídricos del sector agrícola de los Ríos Maule y Longaví, Chile.
- Putaud, J. P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrus, J., ... & Raes, F. (2010). A European aerosol phenomenology–3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environment*, 44(10), 1308-1320.
- Qin, P., Luo, X., Zeng, Y., Zhang, Y., Li, Y., Wu, Y., ... & Zhang, M. (2021). Long-term association of ambient air pollution and hypertension in adults and in children: a systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 796, 148620.
- Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balme, J. R., & Elliott, C. T. (2016). Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives*, 124(9), 1334–1343.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Todling, R., Bacmeister, J., Takacs, L., Liu, H.-C., ... & Bloom, S. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24(14), 3624–3648.
- Rienecker, M. M. et al. (2008). The GEOS-5 Data Assimilation System—Documentation of Versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0. NASA/TM-2008-104606.
- Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. J. B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY). *Environmental Modelling & Software*, 95, 210–228.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote sensing: Models and methods for image processing* (3rd ed.). Academic Press.
- Simmons, J. B., Paton-Walsh, C., Mouat, A. P., Kaiser, J., Humphries, R. S., Keywood, M., ... & Ramirez-Gamboa, J. (2022). Bushfire smoke plume composition and toxicological assessment from the 2019–2020 Australian Black Summer. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(11), 2067-2089.
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077.
- Torres, O., Bhartia, P. K., Taha, G., Jethva, H., Das, S., Colarco, P., ... & Ahn, C. (2020). Stratospheric injection of massive smoke plume from Canadian boreal fires in 2017 as seen by DSCOVR-EPIC, CALIOP, and OMPS-LP observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(10), e2020JD032579.
- Úbeda, X., & Sarricolea, P. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146, 152–161.
- Ulloa Palominos, G. (2020). Evolución temporal de albedo en función de la variabilidad climática en glaciares de Los Andes semiáridos, zona Central de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173930>

- Usha, K. H., Nair, V. S., & Babu, S. S. (2022). Effects of aerosol-induced snow albedo feedback on the seasonal snowmelt over the Himalayan region. *Water Resources Research*, 58(2), e2021WR030140.
- van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., & Boys, B. L. (2010). Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), 847–855.
- Viera González, P. M. (2014). Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Winker, D. M., Hunt, W. H., & McGill, M. J. (2009). Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(11), 2310–2323.
- Zhang, L., Jacob, D. J., Boersma, K. F., Jaffe, D. A., Olson, J. R., Bowman, K. W., ... & Weinheimer, A. J. (2008). Transpacific transport of ozone pollution and the effect of recent Asian emission increases on air quality in North America: an integrated analysis using satellite, aircraft, ozonesonde, and surface observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(20), 6117-6136.