



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE AEROSOL TROPOSFÉRICOS UTILIZANDO LA TÉCNICA LIDAR

Antonieta Silva Riquelme

Concepción, 2015

Caracterización Óptica de Aerosoles Troposféricos utilizando la Técnica Lidar

Tesis elaborada como requisito final para optar al
Grado académico de Doctor en Ciencias Físicas
de la Universidad de Concepción.

Concepción, Agosto de 2015.

Antonieta Silva Riquelme.

Profesor Guía: Dr. Carlos Saavedra .
Profesora Co-Guía: Dra. Elena Montilla

Miembros del Comité:

Dra. Laura Gallardo

Dr. Dante Figueroa



Universidad de Concepción

Dedicado al grupo Lidar-Cefop y a los ex-tigoreros



La realización de esta Tesis fue llevada a cabo en las instalaciones del Laboratorio Lidar-CEFOP y en dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción, y su desarrollo se encuentra en el marco de los siguiente proyecto de apoyo a su realización:



Beca Para Estudios de Doctorado en Chile, año Académico 2010. (21090165). Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica - Conicyt. Programa de Formación de Capital Humano.



Programa de Financiamiento Basal para Centros de Excelencia Científica y Tecnológica de Conicyt: Centro de Óptica y Fotonica (PFB0824)



Proyecto Fondecyt de Iniciación en Investigación: Study and monitoring of aerosol optical properties by tropospheric Lidar system (N° 11110126) 2011-2014.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis papás y hermanas por su apoyo incondicional, por estar siempre conmigo e incentivarme a ser mejor cada día.

A Mauricio, que ha sido mi apoyo y mi compañero, ya empezamos y terminamos las primeras etapas, y nos quedan aún muchas más para ir juntitos. A Marie y Pierre que me acompañaron hasta altas horas de la noche trabajando (o pidiendo un poquito de cariño).

A mis tutores: Carlos Saavedra, porque me dio oportunidades que nunca hubiese imaginado, por su confianza y apoyo. A Elena, que más que mi tutora, se convirtió en una amiga, por las infinitas conversaciones de múltiples temas a la vez y por sus consejos tanto académicos como de la vida. Muchas gracias a ambos por todas las oportunidades que me dieron, y por las experiencias que gracias a ustedes pude vivir.

A mis amigos: Tebo, Vivi y Miguel, por todas las risas, vacaciones y por el cariño que me han dado, los quiero!!; a Johi, que creo ha sido mi animadora número uno durante estos últimos meses; a Ivania porque mi vida necesitaba tener más rosado!; Fabián y Fabiola por su apoyo; a mis amigos que buscaron nuevos rumbos pero que sé que el destino nos volverá a juntar: Taty, Gabriel, Ale, Pablo, Seba, Cristian, a los que siempre tengo presentes.

A mis amigas ya no tan runner: Caro, Pauli, Jime, Mary, Orita, porque la distancia nunca fue tan grande para dejar de preocuparse por mi, por sus palabras de ánimo, sus copuchas y esos mensajes simplemente saludando y dejando buenas vibras para todas.

Además, un especial agradecimiento a Rodrigo por su infinita paciencia conmigo cada vez que lo fui a molestar y a Cristofer, porque junto con Elena, no podría haber pedido estar trabajando en un mejor grupo.

A los tigoreros: Cristian, Marcos, Victor, Michael y todos con los que compartimos almuerzos, olimpiadas, asados y algo de trabajo.

A todos los miembros de LALINET, que más que una red, es una familia, por sus comentarios y ayuda cada vez que lo necesité, en especial a Eduardo, Henrique, Renata, Patricia, Fabio, Daniel, Alvaro, Boris, Andrés, René, Pablo, Jacobo, y a todos con los que he compartido en congresos y viajes.

A todos en el IfT, al profesor Albert por darme la oportunidad de aprender de ellos , Ulla, Birgit, Joerg, Patrick, Holger y a todos los del instituto que me ayudaron muchísimo y en especial a Ronny y Anette que hicieron de mi estancia un viaje inolvidable. Además, darle gracias a Eleni también por su preocupación donde sea que estuviese.

Muchas gracias a todas las personas que me apoyaron durante el proceso de esta tesis :)



Resumen

Las técnicas ópticas de detección remota son muy utilizadas para el monitoreo y caracterización de la atmósfera. Una de éstas es la técnica LIDAR (Light Detection And Ranging), basada en el uso de láseres continuos o pulsados para mediciones atmosféricas, permite el estudio de propiedades ópticas de las partículas en suspensión en la atmósfera en perfiles verticales, con una buena precisión y en un tiempo muy corto. La interacción de la luz con la atmósfera produce fenómenos ópticos, los cuales son detectados y medidos por el sistema, para luego ser procesados.

Para entender la evolución temporal, el transporte y el impacto de la contaminación urbana, es decir, de los aerosoles urbanos e industriales, el Centro de Óptica y Fotónica (CEFOP) ha implementado un sistema Lidar troposférico, el primero de este tipo desarrollado localmente en el país, ubicado en la ciudad de Concepción ($36^{\circ} 47'S$, $73^{\circ} 7'W$, 12m snm). El sistema se encuentra en operación desde Enero de 2012 y en su primera etapa se desarrolló como un sistema Lidar monocanal utilizando la longitud de onda de 532 nm. Para mejorar la información obtenida, durante 2013 el sistema se expandió a un sistema multicanal para la medición de vapor de agua (407 nm) y nitrógeno (387 nm) utilizando canales Raman, además de los aerosoles atmosféricos (355 nm y 532 nm) utilizando canales elásticos. Para obtener los parámetros ópticos característicos de los aerosoles locales, las mediciones son procesadas con un algoritmo de inversión utilizando la inversión de Raman para obtener el factor de mezcla de vapor de agua y el método Klett-Fernald para el coeficiente de backscattering de aerosoles.

En esta tesis se presentan el desarrollo completo e implementación de los algoritmos de inversión para el análisis de las mediciones del sistema Lidar-CEFOP y los métodos de validación utilizados. También se presenta la primera caracterización de la distribución vertical de aerosoles con medidas Lidar que se cuantifica y analiza utilizando un método validado para el procesamiento de las señales, para estudiar la evolución de la capa límite planetaria (PBL) y las propiedades verticales de los aerosoles troposféricos en Concepción. Estos primeros resultados proporcionan información valiosa a largo plazo sobre la contaminación del aire mostrando variaciones estacionales de los coeficientes de extinción y backscattering de los aerosoles.



Abstract

Optical remote sensing techniques are highly used for monitoring atmospheric characteristics. The LIDAR (Light Detection And Ranging) based on the use of pulsed or continuous lasers to atmospheric soundings is one of these above named techniques that allow the the study of optical properties of suspended particles in the atmosphere, with a very good precision and in a very short time. The interaction of the light with the atmosphere produces optical phenomena, which the system detects and measure and then the data are processed.

To understand the temporal evolution, transport and impact of the urban pollution, i.e., urban and industrial aerosols, the Center for Optics and Photonics (CEFOP) has implemented a tropospheric Lidar system, the first of this kind developed locally in the country, located in the city of Concepción ($36^{\circ} 47' S$, $73^{\circ} 7' W$, 12m amsl). To improve the information obtained, during 2013 the system was expanded to a multichannel system for measuring water vapor (407 nm) and nitrogen (387 nm) with the Raman channels, in addition to atmospheric aerosols (355 nm and 532 nm) in elastic channels. To obtain the characteristic optical parameters of local aerosols the measurements are processed with an inversion algorithm using the Raman inversion method for water vapor mixing ratio and the Klett-Fernald method for aerosol backscattering coefficient.

In this thesis the complete development and implementation of the inversion algorithms for analyzing measurements obtained with the Lidar-CEFOP system and the validation methods used are presented. The first characterization of the vertical distribution of aerosols with Lidar measures that is quantified and analyzed using a validated processing method for the signals to study the evolution of the planetary boundary layer (PBL) and vertical properties of tropospheric aerosols in Concepcion also is presented. These first results provide valuable long-term information about air pollution revealing seasonal variations of aerosol backscattering and extinction coefficients.



Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
1. Introducción	1
1.1. Fundamentos del Trabajo Planteado	1
1.2. Técnica Lidar	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivos Generales	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcances del Trabajo Planteado	3
2. Fundamentos de la Técnica Lidar	5
2.1. Estructura de la Atmósfera	5
2.2. Aerosoles Atmosféricos	7
2.3. Vapor de Agua	9
2.4. Interacción Radiación-Atmósfera	9
2.4.1. Propagación de la luz en la atmósfera	9
2.4.2. Parámetros Ópticos de los Aerosoles	13
2.5. Sistema Lidar	15
2.5.1. Tipos de Configuraciones de Sistemas Lidar	15
2.5.2. Consideraciones para un Sistema Lidar	15
2.5.3. Detección de Medidas de un sistema Lidar	17
2.6. Ecuación Lidar	18
2.7. Métodos de Inversión	19
2.7.1. Método de Inversión de Klett-Fernald	19
2.7.2. Método Combinado Elástico-Raman	22
3. Metodología para el Análisis de Datos Lidar	25
3.1. Sistema Lidar Elástico	26
3.1.1. Descripción del Sistema Lidar Elástico	26
3.1.2. Algoritmo de Inversión de Datos Lidar Elástico	27

3.2. Sistema Lidar Inelástico	32
3.2.1. Descripción del Sistema Lidar Raman	32
3.2.2. Algoritmo de Inversión de Datos Lidar Inelástico	32
4. Análisis de señales Lidar elásticas	39
4.1. Medidas Realizadas	39
4.2. Análisis de Eventos Medidos con el Sistema Lidar Elástico	45
4.2.1. 16 de Abril de 2012	45
4.2.2. 10-12 de Abril de 2012	46
4.3. Conclusiones del Análisis de Datos Lidar Elásticos	50
5. Validación de los Algoritmos de Inversión	53
5.1. Validación del Algoritmo para Análisis de Datos Elásticos	54
5.1.1. Primera campaña de medidas simultáneas de las estaciones pertenecientes a LALINET	54
5.1.2. Intercomparación de Algoritmos Lidar en el marco del I Workshop de Algoritmos Lidar-Lalinet	60
5.1.3. Conclusiones	67
5.2. Validación del Algoritmo para análisis de datos Raman	67
5.2.1. Día de Intercomparación	67
5.2.2. Validación por Comparación del Algoritmo para Análisis de Medidas Raman	68
5.2.3. Conclusiones	70
5.3. Mejoramientos Futuros del Algoritmo	71
Conclusiones	73
5.4. Perspectivas del Trabajo	74
Bibliografía	77

Índice de Figuras

2.1. Estructura de la Atmósfera perfil promedio de temperatura respecto a la altura.	6
2.2. Estabilidad de la capa límite planetaria en el ciclo diurno [Stull, 1988].	7
2.3. Forzamiento radiativo sobre el clima por parte de agentes naturales y antropogénicos entre 1750 y 2011 [IPCC 2014].	8
2.4. Interacciones radiación-atmosfera.	10
2.5. Lóbulos de radiación para el caso de scattering elástico de Rayleigh y Mie.	12
2.6. Scattering Stokes, Anti-Stokes y Rayleigh	13
2.7. Sistema Lidar básico.	15
2.8. Sistemas Lidar Biestático y Monoestático	16
2.9. Dependencia del Factor de Overlap (O) con la altura (R) para un sistema biaxial	17
3.1. Medidas Nocturnas en el Observatorio Lidar-CEFOP	26
3.2. Señal Original medida por el sistema Lidar	27
3.3. Ubicación geográfica de la ciudad de Concepción y de la estación Lidar (Google maps)	27
3.4. Montaje del Sistema Lidar-CEFOP (Vista superior)	28
3.5. Diagrama de Bloques del Algoritmo de Inversión Elástico desarrollado.	29
3.6. Superposición de Señal Lidar y Señal Sintética molecular	31
3.7. Diagrama de Bloques del Algoritmo de Inversión Inelástico desarrollado.	34
4.1. Perfiles Promedio del Coeficiente de Extinción de los aerosoles en las diferentes estaciones del año para la ciudad de Concepción, desde Febrero a Septiembre de 2012.	41
4.2. Perfiles Promedio del Coeficiente de Backscattering en las diferentes estaciones del año para la ciudad de Concepción, desde Febrero a Septiembre de 2012.	42
4.3. Resumen de las retrotrayectorias que arribaron a Concepción durante el período entre Febrero y Septiembre de 2012	43
4.4. Series de tiempo del coeficiente de backscattering para un día representativo por cada estación del año, para el periodo entre Febrero a Septiembre de 2012.	44
4.5. Serie de tiempo para el día 16 de Abril de 2012	45

4.6. Perfiles promedio para el coeficiente de Backscattering para el día 16 de Abril de 2012 entre las 20:00 y 22:00 hrs local y para el otoño del mismo año	47
4.7. Retrotrayectorias obtenidas utilizando HYSPLIT para el dia 16 de Abril de 2012 a las 01:00 hrs UTC.	47
4.8. Mapa de MODIS de incendios comenzados entre el 10 y el 19 de Abril del 2012 cercanos a la ciudad de Concepción.	48
4.9. Serie de Tiempo para el Coeficiente de Backscattering para el período entre el 10 al 12 de Abril de 2012	48
4.10. Perfiles de los coeficientes de backscattering promedio para cada día del evento (10, 11 y 12 de Abril de 2012) y perfil promedio del comportamiento del coeficiente de backscattering durante los meses de otoño.	49
4.11. Retrotayectorias obtenidas utilizando HYSPLIT para las masas de aire que llegaron a Concepción durante el período entre el 10 y el 12 de Abril de 2012.	50
4.12. Mapa obtenido utilizando MODIS para identificar incendios durante el período entre el 10 y el 12 de Abril de 2012.	51
4.13. Mapa obtenido utilizando simulaciones NAAPS para concentración superficial de humo el 12 de Abril de 2012 a las 00 UTC.	52
4.14. Mapa obtenido utilizando simulaciones NAAPS para concentración de sulfatos el 12 de Abril de 2012 a las 12 UTC.	52
5.1. Gráficas del Coeficiente de Backscattering de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] obtenidos con el algoritmo de cada estación Lidar perteneciente a LALINET. Las filas (desde arriba hacia abajo) muestran los resultados obtenidos para los datos de cada estación en el siguiente orden: Sao Paulo, Concepción, Manaus y Buenos Aires. Las columnas representan la etapa con la que se estaba trabajando (<i>stage</i>). En general se llegó a una buena aproximación después de 4 etapas, excepto en el caso de Buenos Aires para la que se necesito una etapa más. [Barbosa <i>et al.</i> , 2014].	57
5.2. Comparación de los perfiles del coeficiente de backscattering obtenidos con los diferentes algoritmos de los grupos pertenecientes a Lalinnet, para los datos de la estación de Sao Paulo con desplazamientos entre los canales análogo y de fotoconteo de 0 y 10 bins. [Barbosa <i>et al.</i> , 2014].	59
5.3. Gráficas del coeficiente de backscattering elástico de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] luego del Paso 1 para las distintas longitudes de onda (355 nm, 532 nm y 1064 nm)	61
5.4. Gráficas del coeficiente de backscattering elástico de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] luego del Paso 2 para las distintas longitudes de onda (355 nm, 532 nm y 1064 nm)	62
5.5. Gráficas del coeficiente de backscattering molecular [$Mm^{-1}sr^{-1}$] al comienzo del paso 3 para las distintas longitudes de onda (355 nm, 532 nm y 1064 nm)	63

5.6. Gráficas del coeficiente de backscattering de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] después del paso 3 y la comparación con el resultado de la simulación (celeste) se muestran en las gráficas de arriba. Las gráficas inferiores muestran las diferencias de la solución de cada grupo y la señal simulada que debería resultar (truth).	64
5.7. Gráficas del coeficiente de backscattering [$Mm^{-1}sr^{-1}$] para casos con distintos niveles de ruido para las distintas longitudes de onda: 355 nm (arriba), 532 nm (al medio) y 1064 nm (abajo).	65
5.8. Gráficas de las diferencias del coeficiente de backscattering obtenidos [$Mm^{-1}sr^{-1}$] y la señal real esperada del coeficiente de backscattering [$Mm^{-1}sr^{-1}$] para diferentes niveles de ruido para las distintas longitudes de onda: 355 nm (arriba), 532 nm (al medio) y 1064 nm (abajo).	66
5.9. Serie de tiempo de las medidas rango corregidas obtenidas con el sistema Lidar-Martha del Instituto TROPOS para el 18 de Junio de 2012 entre las 20:00 y las 22:30 UTC para 1064 nm donde se observan tres capas de aerosoles a distintas alturas. [TROPOS]	68
5.10. Comparación de las Curvas de Overlap para el sistema Lidar-MARTHA y el sistema Lidar-Cefop	69
5.11. Comparación de las curvas del coeficiente de backscattering para partículas (355 nm) obtenido utilizando el método de Klett-Fernald. Para este caso, el factor de correlación obtenido fue de 0.885	70
5.12. Comparación de las curvas del coeficiente de backscattering para aerosoles (355 nm) utilizando el método combinado elástico-Raman. El factor de correlación en este caso fue de 0.794	71
5.13. Comparación de las curvas del factor de mezcla de vapor de agua. El factor de correlación entre las curvas fue de 0.998	71



Índice de Tablas

3.1. Parámetros Lidar Elástico	28
3.2. Parámetros Lidar Raman	33
4.1. Número de días de medida realizadas cada mes y total en el período Febrero a Septiembre de 2012.	40
5.1. Descripción de las estaciones Lidar que midieron durante la campaña y los días de Septiembre que cada una midió	55





1

Introducción

En los últimos años, se ha resaltado la importancia del uso de técnicas de detección remota en diferentes áreas de la ciencia, como la del estudio y monitoreo de los efectos antropogénicos sobre la atmósfera y por tanto, sobre el clima del planeta. Una de estas técnicas es la técnica Lidar (Ligth Detection and Ranging), que al ser una técnica de detección remota, se caracteriza por proveer información con una alta resolución espacial y temporal, permitiendo un estudio detallado de las propiedades ópticas de los componentes atmosféricos como los aerosoles y el vapor de agua, así como también de parámetros meteorológicos como la velocidad del viento, la humedad y la temperatura.

En Concepción, la medida y obtención de los parámetros ópticos de los aerosoles se ha realizado con un sistema Lidar troposférico, desarrollado localmente. Este sistema permite el estudio de la evolución de la capa límite planetaria y entrega perfiles verticales de los coeficientes ópticos de extinción y backscattering de los aerosoles presentes en la columna atmosférica. Inicialmente el sistema en operación fue un sistema elástico de un solo canal, que luego se amplió a un sistema multicanal para señales Lidar elásticas e inelásticas. La información obtenida por este sistema, tanto para los canales elásticos (aerosoles) como para los inelásticos (vapor de agua), tiene como objetivo caracterizar, en función de la evolución temporal y espacial de los parámetros ópticos, los aerosoles troposféricos y el vapor de agua en la atmósfera local.

1.1. Fundamentos del Trabajo Planteado

La polución es la presencia de la materia (gas, líquido y sólido) o energía (calor, ruido, radiaciones) cuya naturaleza, ubicación o cantidad directa o indirectamente al-

tera las características o procesos de cualquier parte del medio ambiente, y causa (o tiene el potencial de causar) daño a la condición, la salud, la seguridad o el bienestar de los animales, los seres humanos, las plantas, o los bienes [WebFinance]. El llamado Gran Concepción (que comprende las comunas de Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Hualqui, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Tomé) aloja muchas industrias como las de pesca, acero, compañías de plásticos, refinerías. Tomando en cuenta toda esta actividad industrial y su ubicación cercana a la costa, la medición de concentración de contaminantes sobre esta área toma vital importancia, debido a las potenciales fuentes de contaminación cercanas a un área metropolitana de aproximadamente un millón de habitantes donde no existen medidas en perfil de estas partículas.

Durante los últimos años se han desarrollado diferentes tipos de técnicas de monitoreo atmosférico. Estas técnicas se pueden dividir, respecto al procedimiento de muestreo, entre *in situ* y detección remota. En la primera, los contaminantes son medidos directamente. Las técnicas *in situ* tienen la ventaja que permiten determinar parámetros ópticos, químicos y microfísicos, pero no tienen resolución vertical. Por otro lado, las técnicas de detección remota son técnicas que obtienen información de interés a través del análisis de datos recolectados por instrumentos que no están en contacto físico con los objetos en investigación. Al no tener contacto con la muestra, se disminuye la posibilidad de generar errores causados por la manipulación y la posible contaminación de las mismas en técnicas convencionales de recolección.

En este trabajo se utilizará la técnica Lidar para el estudio de las propiedades ópticas de los aerosoles troposféricos (coeficientes de extinción y backscattering), así como su evolución y la identificación de los principales eventos de polución en el sitio de medida.

1.2. Técnica Lidar

Las técnicas de detección remota son ampliamente utilizadas para la medición de la polución. Entre sus principales ventajas, cuando son comparadas con las técnicas in-situ existentes, está la posibilidad de monitorear la atmósfera sin la necesidad de interferir en los constituyentes en estudio. Una de las técnicas de detección remota que permite medir las propiedades ópticas de los aerosoles y gases traza, y así caracterizarlos, es la técnica Lidar (Light Detection and Ranging); que además, a través de las medidas y la información continua que provee, permite estudiar la evolución temporal, el transporte y el impacto de la contaminación urbana.

Con un sistema Lidar se obtienen las propiedades ópticas de constituyentes atmosféricos, como los aerosoles y el vapor de agua, que juegan un papel importante dentro de la atmósfera. En el caso de los aerosoles, su importancia se debe a su papel en el balance radiativo de la Tierra y por sus impactos sobre la salud de las personas y los ecosistemas. Y en el caso del vapor de agua, no sólo por su importancia en la

formación de nubes, sino también en el transporte de calor en la atmósfera, y como agente termorregulador, debido al efecto invernadero que produce.

Para obtener las propiedades ópticas de los constituyentes atmosféricos de interés, como los coeficientes de extinción y backscattering de aerosoles, y a la vez estudiar su evolución espacial y temporal, la señal Lidar debe ser procesada utilizando algoritmos de inversión, que se desarrollan dependiendo del tipo de señal registrada (elástica o inelástica).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Generales

- Determinar los parámetros ópticos de aerosoles troposféricos y vapor de agua locales utilizando la técnica Lidar para realizar monitoreos a corto y largo plazo.
- Estudiar y caracterizar la evolución de los aerosoles troposféricos en la región en función de los parámetros ópticos medidos (coeficientes de backscattering y extinción).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar los algoritmos de inversión de datos para el procesamiento de las señales Lidar elástica e inelástica.
- Caracterizar la evolución espacial y temporal de las propiedades ópticas de los aerosoles troposféricos y los gases traza (vapor de agua, nitrógeno) locales, utilizando la técnica Lidar.
- Realizar campañas de medida de aerosoles troposféricos locales y en conjunto con la Red Latinoamericana de Lidar (LALINET por sus siglas en inglés), para estudios de transporte de aerosoles en Sudamérica.

1.4. Alcances del Trabajo Planteado

Debido al aumento en la contaminación en diversas ciudades del país, se han buscado nuevas formas de monitoreo ambiental. Las principales técnicas que se han utilizado hasta el día de hoy son medidas *in situ* a nivel de superficie, las cuales permiten conocer concentraciones de material particulado de tamaños del orden de 2.5 a 10 [μm]. Con estos resultados se gestiona el monitoreo ambiental y se dan a conocer los episodios críticos en caso de existir.

El desarrollo de la técnica Lidar permite conocer parámetros ópticos de interés que a su vez, permiten estudiar y caracterizar la evolución de los aerosoles troposféricos. Así, se puede analizar el comportamiento de éstos durante las distintas estaciones del año y reconocer fácilmente cuando sucede algún evento de polución atmosférica. Las medidas obtenidas con el sistema Lidar, complementan las medidas *in situ*, permitiendo caracterizar de forma completa la columna atmosférica.

El sistema desarrollado, al ser un sistema transportable, permite ser reubicado para caracterizar otras ciudades del país. Además, debido a que el sistema fue desarrollado localmente, se seguirá mejorando agregando más canales de medida y creando nuevos códigos que permitan complementar las medidas Lidar con medidas de otros instrumentos ópticos complementarios, como un espectrómetro diferencial DOAS, un fotómetro solar o datos satelitales.



2

Fundamentos de la Técnica Lidar

La evolución en el estudio de la polución atmosférica ha implicado la búsqueda y uso de distintas técnicas para su medición. Entre las técnicas de detección remota se encuentra la Técnica Lidar, cuyo funcionamiento se comprende a partir de saber qué es lo que se mide, dónde se mide y cómo se mide. En este capítulo, primero se revisará la estructura de la atmósfera terrestre, que es el sitio en el cual se encuentran las partículas de interés, luego se explicará qué es lo que mide en específico el sistema Lidar, es decir, partículas (aerosoles) y vapor de agua. Más adelante, se explicarán las interacciones radiación-atmósfera que permiten medir las propiedades ópticas de interés de las partículas contaminantes, para finalmente explicar en qué consiste un sistema Lidar.

2.1. Estructura de la Atmósfera

La atmósfera terrestre se divide en cinco regiones: Tropósfera, Estratósfera, Mesósfera, Termósfera y Exósfera (Fig.2.1), las cuales se diferencian por los procesos físicos y químicos que toman lugar en cada una de ellas. Considerando que el estudio realizado y presentado en este trabajo se centra en la capa que tiene contacto directo con la superficie, se profundizará sólo en la Tropósfera. En esta capa además se encuentra la Capa Límite Planetaria, que es la zona de la Tropósfera en contacto directo con la superficie terrestre y donde se concentra la mayor parte de las partículas contaminantes.

- **Tropósfera:** Es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie de la Tierra, su extensión varía entre 10-15 km sobre la superficie terrestre, siendo más extensa en el Ecuador que en los polos. Esta capa contiene el 75 % de la masa de la atmósfera. A medida que aumenta la altura, la presión y la temperatura disminuyen en la

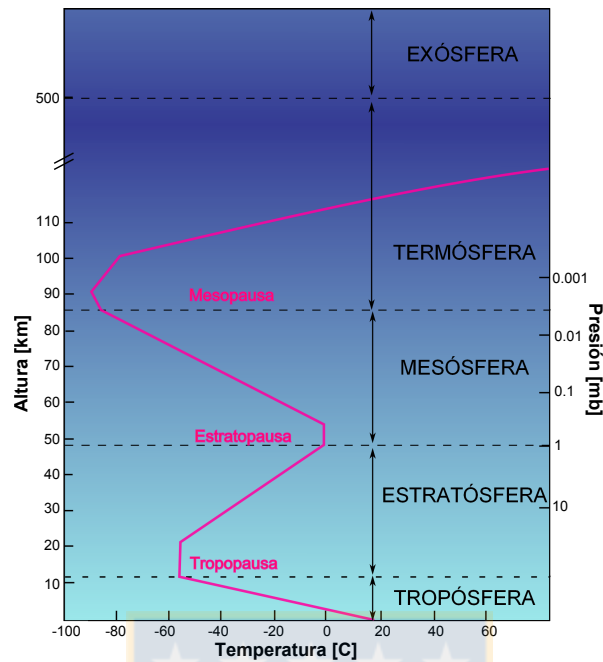


Figura 2.1: Estructura de la Atmósfera perfil promedio de temperatura respecto a la altura.

tropósfera. La temperatura disminuye en 6°C por cada kilómetro de altura. Ésta es la capa en la que ocurren los fenómenos meteorológicos más importantes y que afectan directamente la vida en la superficie.

La tropósfera aumenta su temperatura principalmente por la absorción de la radiación de ondas largas (longitudes de onda entre 3 a $200\ \mu\text{m}$) emitidas por la superficie terrestre, la cual, a su vez, se calienta por la absorción de la radiación solar (ondas cortas, longitudes de onda entre $0,2$ a $3\ \mu\text{m}$).

- Capa Límite Planetaria:** (PBL por sus siglas en inglés) Es la región de la atmósfera adyacente a la superficie, cuya estructura dinámica termodinámica es determinada por la interacción entre la atmósfera y la superficie en una escala de tiempo inferior a 1 hora [Stull, 1988]. Sobre las superficies continentales y en ausencia de disturbios en la escala sinóptica, la PBL es caracterizada por una capa de mezcla durante el día y por una capa de inversión térmica durante la noche. Los aerosoles atmosféricos se distribuyen a lo largo de la PBL de forma que su concentración en ella es determinada por el comportamiento de la capa de mezcla. En la Fig. 2.2 se puede observar el ciclo diario de la capa límite.

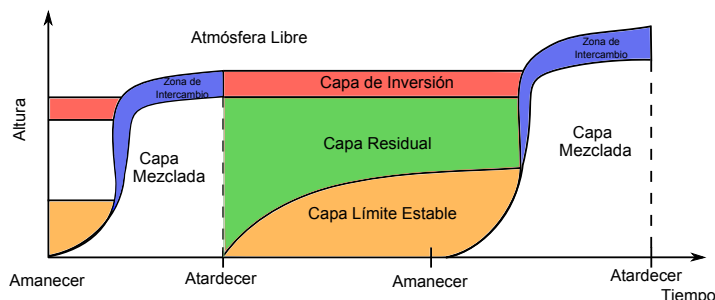


Figura 2.2: Estabilidad de la capa límite planetaria en el ciclo diario [Stull, 1988].

2.2. Aerosoles Atmosféricos

Los aerosoles son partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en un gas, cuyos diámetros típicos varían desde el orden de los nanómetros al orden de los milímetros, con un amplio rango dinámico de composición y formas, dependiendo de sus fuentes y de los procesos atmosféricos [Kobayashi, 1987].

Los aerosoles pueden ser naturales o antropogénicos, algunos de ellos son emitidos directamente a la atmósfera (aerosoles primarios), mientras que otros son formados en la atmósfera a partir de precursores gaseosos a través de producción fotoquímica (aerosoles secundarios). La naturaleza de los aerosoles antropogénicos ha cambiado a consecuencia de la evolución de las emisiones industriales y las actividades diarias, principalmente relacionadas con la combustión. Entre los aerosoles naturales se incluye el polvo desértico, actividades volcánicas, el polen y la sal de mar.

Los aerosoles en la atmósfera son arrastrados por las masas de aire, las cuales permiten que se desplacen a diversos lugares del planeta, para finalmente ser eliminadas por diversos procesos como la acción gravitatoria, condensación, precipitación. El tiempo durante el cual los aerosoles permanecen en la atmósfera se denomina *tiempo de vida* y va desde los minutos a semanas en la tropósfera, o incluso años, como en el caso de las partículas de erupciones volcánicas que alcanzan la estratósfera, pues a esas alturas no ocurren procesos de condensación o precipitación, por lo que las partículas no son eliminadas fácilmente con estos procesos.

En el estudio de aerosoles es importante conocer las fuentes que los producen y algunas características del medio en el que se encuentran, además de tener en cuenta si existen aerosoles hidrófilos, ya que al condensarse vapor de agua alrededor de ellos pueden cambiar sus características y propiedades ópticas. Algunos de los aerosoles que tienen este comportamiento son los aerosoles marinos.

Los aerosoles son importantes en los estudios de cambio climático ya que éstos inter-

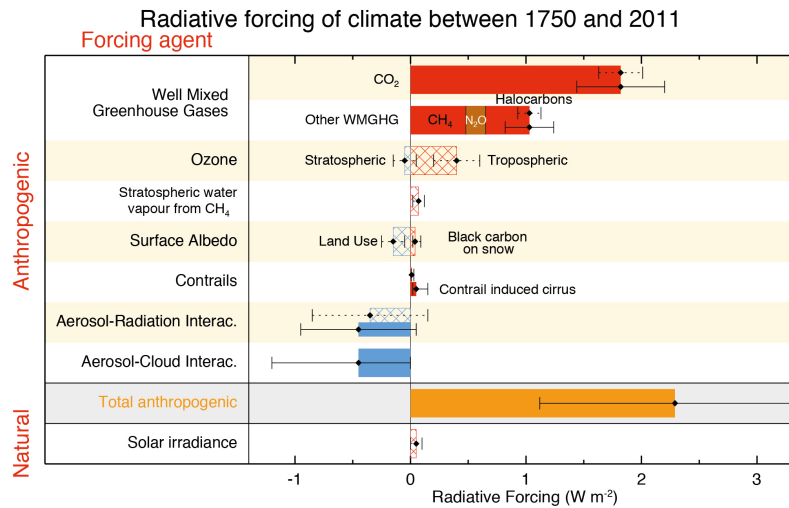


Figura 2.3: Forzamiento radiativo sobre el clima por parte de agentes naturales y antropogénicos entre 1750 y 2011 [IPCC 2014].

actúan de diversas formas con la atmósfera y el resultado total de estos efectos afecta el balance radiativo y el clima de la Tierra (Fig. 2.3). Pero la cuantificación del forzamiento radiativo que producen es muy complejo, ya que la masa y las concentraciones de éstos son altamente variables en el espacio y el tiempo. [IPCC 2014]. Las interacciones de los aerosoles con la atmósfera pueden ser de forma directa, indirecta o semi-directa, como se explica a continuación:

- **Modo Directo:** El modo directo de la interacción de los aerosoles y la atmósfera es el relacionado con las interacciones directas de las partículas con la radiación (scattering, absorción y emisión), es decir, es el aporte que realizan los aerosoles al forzamiento radiativo terrestre debido a la absorción y esparcimiento de la radiación solar en la atmósfera.
- **Modo Indirecto:** En el modo indirecto se tienen dos efectos: El primero llamado *Efecto Twomey* y el segundo que tiene que ver con el tiempo de vida de las nubes. El primer efecto indirecto se debe a que algunos aerosoles, como los sulfatos, actúan como núcleos de condensación de nubes [Hegg *et al.*, 1993] aumentando el número de gotas de agua, lo que conlleva a que una cierta cantidad de agua necesite una superficie más grande. Este efecto incrementa el albedo terrestre (proporción de la luz incidente o radiación reflejada por la superficie terrestre), produciendo un forzamiento radiativo negativo; el segundo efecto se debe a que al aumentar el número de gotas de agua disminuye el tamaño promedio de éstas, afectando su velocidad terminal, pues gotas más pequeñas tienen velocidad terminal menor, lo que hace menos posible que se agrupen y precipiten [Albretch, 1989].

Así, las nubes retienen mayor cantidad de agua en forma líquida y tienen mayor tiempo de vida, lo cual también contribuye al forzamiento radiativo negativo.

- **Modo Semi-Directo:** El modo semi-directo se debe a la capacidad de absorber radiación de onda corta por parte de los aerosoles, ya que la absorción de radiación solar por parte de éstos (en especial del *black carbon*) lleva a un calentamiento del aire lo cual resulta en la evaporación de gotas de agua. Esto reduce la cobertura de nubes y contribuye al forzamiento radiativo positivo. [Ackerman *et al.*, 2000].

2.3. Vapor de Agua

El vapor de agua es uno de los gases invernadero dominantes en la atmósfera terrestre y tiene un rol importante en los procesos de transferencia de radiación, la formación de nubes y la circulación atmosférica [Bruegge *et al.*, 1992, Goldsmith *et al.*, 1998]. Además, la absorción de agua afecta de manera considerable el tamaño, forma y composición química de algunas partículas [Reichardt *et al.*, 1996], lo que a su vez afecta el forzamiento radiativo. En esto radica la importancia de medir simultáneamente perfiles verticales de aerosoles y densidades de vapor de agua, para investigar las relaciones entre ambos parámetros y determinar las características de los aerosoles.

El vapor de agua puede variar con algunos eventos tales como las erupciones volcánicas, donde una cantidad variable de vapor de agua es liberada a la atmósfera. El contenido de vapor de agua en la atmósfera puede ser expresado usando varias medidas, estas incluyen presión de vapor, humedad específica, factor de mezcla, temperatura del punto de rocío y humedad relativa. Para el estudio de aerosoles se utiliza el factor de mezcla de vapor de agua, el cual es un trazador de parcelas de aire y ayuda en la comprensión de fenómenos de transporte de energía en la atmósfera [Whiteman *et al.*, 1992].

2.4. Interacción Radiación-Atmósfera

2.4.1. Propagación de la luz en la atmósfera

La interacción de un haz láser al propagarse en la atmósfera está dada por la Ley de Beer-Lambert, que es una aproximación de la transmisión lineal de un haz de luz monocromático a través de la atmósfera

$$I(\lambda, t', x) = I(\lambda, t, 0) \exp \left[- \int_0^x \alpha(\lambda) N(x', t) dx' \right], \quad (2.1)$$

donde

- $I(\lambda, t', x)$ es la intensidad del haz propagado en una trayectoria x .

- $\alpha(\lambda)$ es el coeficiente de extinción o atenuación del haz láser.
- $N(x', t)$ es la distribución espacial y temporal de las especies que están produciendo la absorción.
- λ es la longitud de onda de la luz monocromática.
- t' es un parámetro de tiempo, el cual se inserta para recordar el retardo de la propagación.

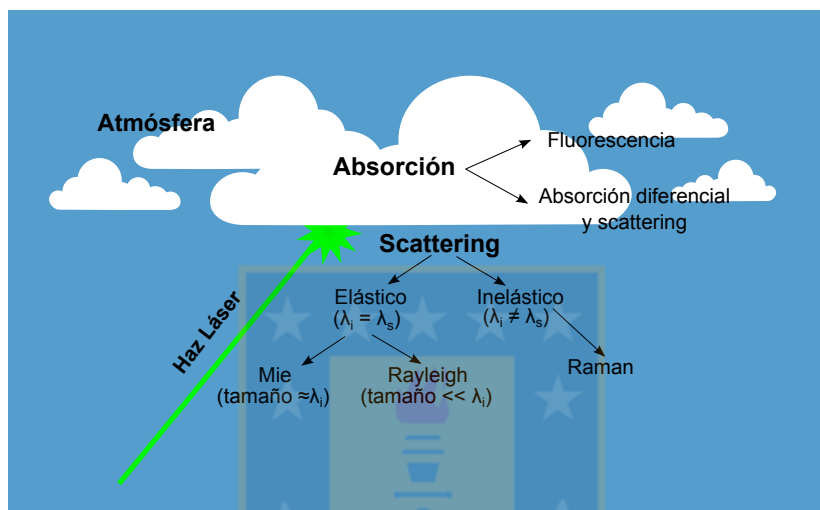


Figura 2.4: Interacciones radiación-atmósfera.

Para describir la interacción radiación-atmósfera, se deben comprender los procesos que allí ocurren, los cuales se muestran en la Fig. 2.4. En nuestro caso nos centraremos en el scattering tanto elástico como inelástico, es decir, en el scattering Mie o Rayleigh y el scattering Raman para describir las propiedades ópticas características de los aerosoles atmosféricos.

Scattering Elástico

Se denomina scattering elástico al proceso en el cual los fotones son absorbidos por átomos o partículas y luego son re-emitidos por el mismo átomo con la misma longitud de onda. Esto implica que no ocurre pérdida de energía y el átomo vuelve al estado de energía en el cual se encontraba antes de absorber el fotón.

En la atmósfera, las partículas que producen scattering van desde tamaños del orden de 10^{-8} cm (moléculas de gas) hasta tamaños del orden de 1 cm (granizo). En general se emplea el nombre de moléculas para referirnos a aquellas partículas cuyo tamaño permite la aproximación de Rayleigh, mientras que partículas se suele utilizar para la dispersión de Mie.

- a) **Scattering de Rayleigh:** El scattering de Rayleigh [Bates, 1984, Bucholtz, 1995, Bodhaine *et al.*, 1999] describe el scattering de la luz debido a las moléculas, en este caso, del aire, y puede ser extendido al scattering de partículas de hasta una décima parte de la longitud de onda de la luz, puede ser considerado un scattering elástico ya que las energías de los fotones dispersados no cambian en el proceso.

El scattering de Rayleigh se refiere a la intensidad dispersada por un dipolo de tamaño mucho menor que la longitud de onda:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \theta), \quad (2.2)$$

donde N es el número de dispersadores, α es la polarizabilidad, y R es la distancia al dispersor.

Uno de los parámetros de gran importancia en el estudio del scattering de la radiación es la sección eficaz de scattering σ_R , la cual es directamente proporcional a la probabilidad de que exista una interacción y está dada por

$$\sigma_R = \frac{\alpha^2 128\pi^5}{3\lambda^4} \quad (2.3)$$

La polarizabilidad, para las ecuaciones anteriores, viene dada de la aproximación de Lorentz-Lorenz como

$$\alpha = \frac{3}{4\pi N_s} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \quad (2.4)$$

donde N_s es el número total de moléculas por unidad de volumen y n es el índice de refracción.

Además, se define el factor de eficiencia de dispersión Q como

$$Q = \frac{128\pi^4 r^4}{3\lambda^4} \left[\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right]^2 \quad (2.5)$$

- b) **Scattering de Mie:** El scattering de moléculas y partículas muy pequeñas ($< \lambda/10$) es predominantemente el scattering de Rayleigh. Para partículas de tamaños mayores a una longitud de onda, predomina el scattering de Mie [Mie, 1908]. Este scattering produce un patrón como el lóbulo de una antena, con un lóbulo más agudo y más intenso hacia adelante para partículas más grandes (Fig.2.5).

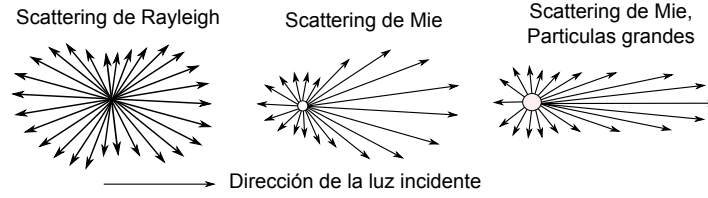


Figura 2.5: Lóbulos de radiación para el caso de scattering elástico de Rayleigh y Mie.

La teoría de Mie es una solución completamente analítica a las ecuaciones de Maxwell para el scattering de la radiación electromagnética debido a partículas esféricas. Es por esto que para utilizar esta teoría se debe asumir que la partícula es una esfera, y que es homogénea, de forma que puede ser caracterizada por un único índice de refracción para una longitud de onda dada.

La sección eficaz de scattering de una partícula aislada en la teoría Mie está dada por

$$\sigma_{ext}(x, m) = \pi r^2 Q_{ext}(x, m) \quad (2.6)$$

donde x es la función de distribución de tamaño, dado por

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.7)$$

y Q_{ext} es el factor de eficiencia de extinción de Mie de una partícula de radio r e índice de refracción m cuando interactúa con una longitud de onda λ .

Además, utilizando la teoría de Mie, se obtiene la carga total de aerosoles en la columna atmosférica, también llamado espesor óptico de extinción de aerosoles (AOD), el cual se obtiene como la suma de la extinción de las partículas, es decir

$$AOD = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \pi r^2 Q_{ext}(x, m) \frac{n(r)}{r} dr \quad (2.8)$$

Scattering Inelástico

Además del scattering elástico, existe el scattering inelástico o Raman [Raman C., 1930]. Cuando la radiación se dispersa inelásticamente a partir de moléculas se produce un desplazamiento en frecuencia (y por tanto en longitud de onda) característico para cada molécula. Este proceso produce un cambio del estado cuántico de la molécula (rotacional y/o vibracional), y la frecuencia del fotón dispersado se desplaza. Si la molécula absorbe energía, es decir, se excita a un nivel de energía más alto, disminuye

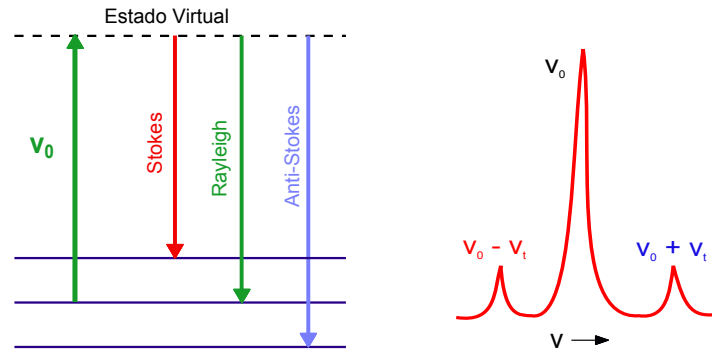


Figura 2.6: *Derecha:* Scattering Rayleigh (sin intercambio de energía, por lo que los fotones incidentes y emitidos tienen la misma energía), Scattering Stokes (el átomo o molécula absorbe energía y el fotón emitido tiene menos energía que el fotón absorbido) y Scattering Anti-Stokes (el átomo o molécula pierde energía y el fotón emitido tiene más energía que el fotón absorbido). *Izquierda:* Corrimientos en frecuencia en el caso de los scattering inelásticos respecto al scattering elástico ν_0 .

la energía del fotón dispersado, y la longitud de onda se desplaza hacia el rojo. A este proceso inelástico le llamamos **scattering Raman Stokes**. Si la molécula transfiere energía al fotón dispersado disminuyendo su nivel de energía, la frecuencia del fotón dispersado aumenta, la longitud de onda se desplaza hacia el azul, y entonces le llamamos **scattering Raman Anti-Stokes** (Fig. 2.6). El desplazamiento en frecuencia debido al scattering inelástico depende de la molécula estudiada y viene dado por

$$\Delta\nu = \nu_1 \pm \nu_2 = \frac{\Delta E}{hc}, \quad (2.9)$$

donde $\nu_1 = 1/\lambda$, hace referencia al número de onda (cm^{-1}), ΔE es la diferencia de energía entre los niveles energéticos involucrados de la molécula, h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz en el vacío.

2.4.2. Parámetros Ópticos de los Aerosoles

Coefficiente de Extinción

La luz en la atmósfera es atenuada debido a la **absorción** y *scattering* por moléculas y partículas. La atenuación de la intensidad entrante $P(z)$ puede ser descrita por

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha P(z), \quad (2.10)$$

donde α es el coeficiente de extinción o atenuación.

Generalmente, el coeficiente de extinción se escribe en términos de coeficientes que representan los diferentes fenómenos que causan la extinción del haz,

$$\alpha(\lambda) = \alpha_a(\lambda) + \alpha_R(\lambda) + \alpha_M(\lambda) \quad (2.11)$$

donde el subíndice a es la contribución de la absorción, R es la contribución debido al scattering de Rayleigh (contribución molecular) y M es la contribución debido al scattering de Mie (contribución debida a aerosoles).

Si los perfiles de temperatura $T(z)$ y presión $P(z)$ son conocidos, el coeficiente de extinción molecular puede ser calculado de la siguiente ecuación

$$\alpha_{mol}(z, \lambda, p, T) = \frac{8\pi^3(m_{air}^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N_S^2} \frac{6 + 3\gamma}{6 - 7\gamma} N_S \frac{T_0 p(z)}{p_0 T(z)}, \quad (2.12)$$

donde m_{air} es el índice de refracción del aire, γ el factor de depolarización, λ la longitud de onda, N_S es la densidad numérica molecular, $T(z)$ el perfil de temperatura, $p(z)$ el perfil de presión, T_0 la temperatura estándar y p_0 la presión estándar.

Coefficiente de Backscattering

Debido al tamaño y forma de los aerosoles, la dispersión ocurre en varios ángulos comparados con la dirección original de la luz (función de fase). Los fotones dispersados con un ángulo de 180° , son llamados retrodispersados (*backscattering*).

El coeficiente de backscattering, β , es una manera formal de describir la cantidad que se dispersa de vuelta en la dirección de la luz entrante. Este coeficiente, al igual que el coeficiente de extinción, se escribe en función de la contribución de los aerosoles y las moléculas, es decir

$$\beta = \beta_{aer} + \beta_{mol}. \quad (2.13)$$

La relación entre los coeficientes de extinción y backscattering debido a las moléculas puede ser expresada usando la siguiente ecuación

$$\frac{\alpha_{mol}(\lambda, z)}{\beta_{mol}(\lambda, z)} = \frac{8\pi}{3}, \quad (2.14)$$

La relación entre los coeficientes de extinción y retrodispersión, en el caso de los aerosoles, se denomina *lidar ratio* y varía con el tipo, tamaño, longitud de onda y altura de las partículas. Dentro del estudio de aerosoles, este parámetro es de gran interés, ya que permite resolver la ecuación Lidar para el caso del scattering elástico.

2.5. Sistema Lidar

Un sistema Lidar se compone de tres módulos principales: una fuente (láser), un sistema de envío y recolección (telescopio) y un sistema de detección (detectores y módulos de adquisición), como se muestra en la Fig. 2.7.

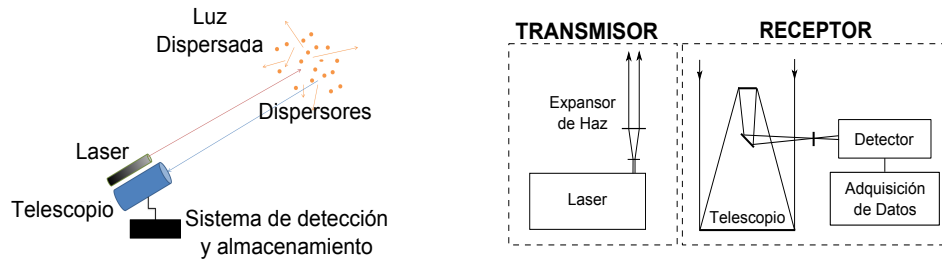


Figura 2.7: Sistema Lidar básico.

2.5.1. Tipos de Configuraciones de Sistemas Lidar

Dependiendo de cómo se encuentren organizados los sistemas transmisor y receptor, los sistemas Lidar se pueden configurar de dos formas: sistemas monostáticos y sistemas biestáticos, como se muestra en Fig. 2.8. En el caso biestático, el transmisor y el receptor se encuentran alejados, por lo que la superposición ocurre a una altura mayor que en el caso monoestático. Además, en el caso monoestático también existen dos configuraciones: un arreglo biaxial donde el haz láser y el eje del receptor se encuentran separados, y el haz sólo entra al campo de visión del receptor óptico después de cierta altura predeterminada. Este arreglo evita la radiación de backscattering en el campo cercano, impidiendo que el detector se sature. El otro arreglo es el coaxial, en el que el haz láser emitido coincide con el eje del receptor óptico, por lo que el receptor puede obtener información desde la altura a la que se encuentra el sistema. El problema del backscattering debido al campo cercano en un sistema coaxial puede ser resuelto ya sea cambiando la ganancia del fotodetector o ubicando un obturador.

La mayor parte de los sistemas Lidar en la actualidad utilizan la configuración monoestática, ya sea con arreglos coaxiales o biaxiales. La elección de la configuración (coaxial o biaxial) se determina por el rango de detección que se desea. Si se buscan medidas en el campo cercano, se utiliza el arreglo coaxial. Si no se buscan medidas en el campo cercano, se utilizan arreglos biaxiales.

2.5.2. Consideraciones para un Sistema Lidar

Los principales requisitos de un láser para ser utilizado en detección remota son: coherencia espacial y temporal, corta duración del pulso, baja divergencia y alta poten-

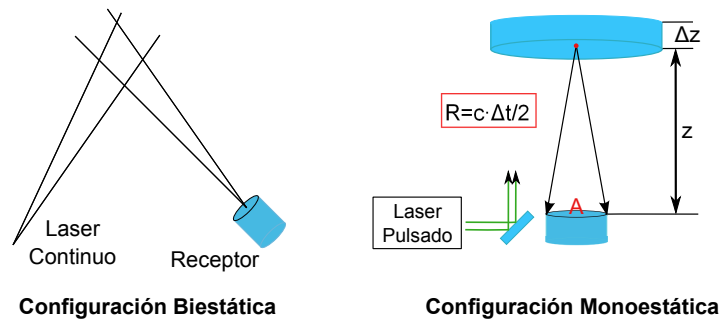


Figura 2.8: Sistemas Lidar biestático y monoestático, los cuales se diferencian en la posición del emisor y el receptor.

cia. Todas estas características permitirán que el sistema genere una buena resolución espacial y que la señal medida sea de largo alcance.

Por otro lado, para el caso del detector, las características en las que se debe prestar atención son: la respuesta espectral, la eficiencia cuántica (capacidad de los fotodetectores de convertir energía lumínica en energía eléctrica), la frecuencia de respuesta y la ganancia de corriente.

Además de los requisitos anteriormente nombrados, otra consideración importante en los sistemas Lidar es el factor de overlap, que permite conocer la altura desde la cual las medidas son confiables.

Factor de Overlap

Para obtener medidas con el sistema Lidar, se debe asegurar que el haz láser está contenido dentro del campo de visión del telescopio. La altura mínima a la que el haz láser está completamente contenida sobre el detector a través de la óptica de detección, se denomina overlap. Este factor varía entre 0 y 1, define la distancia desde la que el sistema Lidar posee medidas útiles (Fig. 2.9).

Debido a que la magnitud de la señal varía como $1/r^2$, la señal aumenta a medida que la distancia del overlap completo disminuye [Kovalev & Eichinger, 2004]. La distancia del overlap puede ser ajustada controlando el campo de visión del telescopio o la divergencia del haz láser.

Este factor se puede calcular de forma geométrica o utilizando los datos obtenidos con el sistema Lidar como se mostrará en el Capítulo 3.

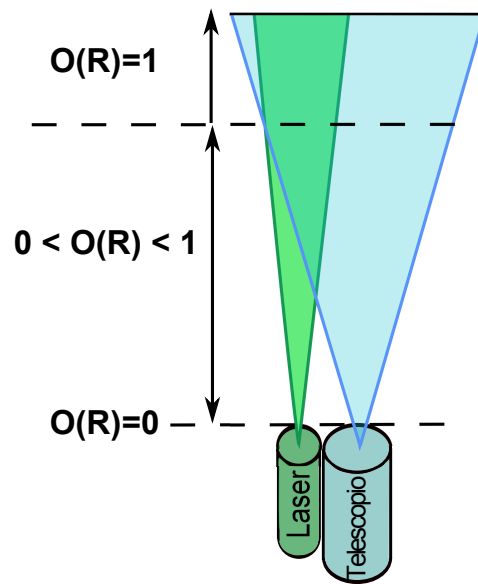


Figura 2.9: Dependencia del Factor de Overlap (O) con la altura (R) para un sistema biaxial

2.5.3. Detección de Medidas de un sistema Lidar

La detección de medidas Lidar usualmente se realiza a través de tubos fotomultiplicadores. Éstos reciben la señal de potencia de retorno de backscattering, la amplifican y la convierten en una señal eléctrica que luego es digitalizada. Éstos tubos fotomultiplicadores cubren un rango en longitudes de onda desde los 300 nm a los 900 nm. En el caso que se desee detectar señales en el infrarrojo, son utilizados fotodiodos de avalancha.

Dependiendo del tipo de medida que se realice existen dos modos de detección: el modo análogo y el modo de fotoconteo. En el modo análogo, la señal de retorno se convierte en una señal de voltaje análogo que se mide en [mV]; y en el caso del fotoconteo, debido a que la señal es mucho más débil que en el modo análogo, el tubo fotomultiplicador genera pulsos de voltaje correspondientes a los fotones que inciden en el detector, lo cual se mide en [MHz].

La detección de medidas en el caso de nuestro Lidar se realiza utilizando un sistema LICEL (Lidar Computing and Electronics), el cual es un sistema de adquisición de datos especialmente diseñado para aplicaciones de detección remota. En este sistema, en cada canal elástico permite la adquisición simultánea de datos en los modos análogo y de fotoconteo. Mientras que para los canales inelásticos, sólo realiza la adquisición en el modo de fotoconteo.

2.6. Ecuación Lidar

La ecuación Lidar [Nicolae & Cristescu, 2006] es una ecuación semi-empírica que relaciona la señal de retorno con características del sistema y con las propiedades ópticas de las partículas de interés. Esta ecuación determina la potencia recibida por el dispositivo detector en función de la altura, la potencia inicial del haz emitido hacia la atmósfera, las propiedades ópticas atmosféricas hacia las que se dirige el haz por medio de la ley de Beer-Lambert y las características de los instrumentos utilizados en la transmisión y recepción.

La forma más sencilla de escribir la ecuación LIDAR es

$$P(z) = KG(z)\beta(z)T(z), \quad (2.15)$$

es decir, la potencia P recibida desde una distancia z se compone de cuatro factores:

- K , es una constante que describe el funcionamiento del sistema LIDAR.
- $G(z)$, describe la geometría de medición rango-dependiente.
- $\beta(z)$, es el coeficiente de retrodispersión del haz a una distancia R .
- $T(z)$, es el término de transmisión del haz en la atmósfera.

Si sólo se considera el scattering elástico (Rayleigh o Mie), la potencia de la luz que retorna debido al backscattering a una longitud de onda dada, $P(z, \lambda)$, y considerando que la longitud que se envía a la atmósfera es la misma que retorna ($\lambda = \lambda_0$), la ecuación 2.15 se escribe como

$$P(z, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta \frac{O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha(z, \lambda) dr\right) \quad (2.16)$$

donde $P(z, \lambda)$ es el flujo de energía del láser retrodispersada en la longitud de onda λ desde una distancia z , P_0 es el flujo de energía emitida del láser en la longitud de onda λ_0 ; c es la velocidad de la luz, τ es el tiempo de vuelo de la señal, A es el área de recepción del telescopio, η es la eficiencia del sistema, $O(R)$ es la función de solapamiento, $\beta(R, \lambda)$ es el coeficiente de retrodispersión total y $\alpha(R, \lambda)$ es el coeficiente de extinción total.

En el caso de un sistema inelástico, la longitud de onda emitida es distinta a la retrodispersada, $\lambda_0 \neq \lambda_{Ra}$, y la ecuación Lidar es entonces escrita como

$$P(\lambda_{Ra}, z) = P(0) \frac{O(z)}{z^2} C_s(\lambda_{Ra}) \beta_{\lambda_{Ra}}(z) \exp[\alpha_{\lambda_0}(\zeta) + \alpha_{Ra}(\zeta)d\zeta] \quad (2.17)$$

donde $P\lambda_{Ra}, z$ es la potencia recibida debido al scattering inelástico en la longitud λ_{Ra} , $P(0)$ es la potencia del láser en la longitud de onda λ_0 , C_s es una constante que representa la eficiencia del sistema dependiente de la longitud de onda, β_{Ra} es el coeficiente

de backscattering para el scattering vibracional-rotacional.

Para resolver la ecuación Lidar se utiliza el Lidar Ratio, descrito en la sección 2.4.2, y dados por

$$LR^{aer}(z) = \frac{\alpha^{aer}(z)}{\beta^{aer}(z)} \quad (2.18)$$

$$LR^{mol}(z) = \frac{\alpha^{mol}(z)}{\beta^{mol}(z)} \quad (2.19)$$

para el caso de los aerosoles y moléculas respectivamente.

2.7. Métodos de Inversión

En ciencias, los métodos de inversión son los procesos a través de los cuales se calculan los observables a partir de las variables que los producen. Se denominan métodos de inversión porque se comienza a trabajar desde los resultados para calcular las causas que los producen.

En nuestro caso, se tiene una única ecuación que resume todos los procesos y dos variables desconocidas, es por este motivo que para resolver la ecuación que encierra los procesos y variables se debe aplicar un método de inversión.

Dependiendo del tipo de sistema con el cual se adquieren las medidas, se utilizan distintos métodos para obtener los parámetros ópticos de interés. Para la obtención de los coeficientes de extinción y retrodispersión de partículas se utilizará el método de Klett-Fernald [Fernald, F., 1984, Klett, 1983] en el caso elástico, mientras que para el caso de un sistema inelástico se utilizará el método combinado Elástico-Raman [Ansmann *et al.*, 1990, Ansmann *et al.*, 1992].

2.7.1. Método de Inversión de Klett-Fernald

En el caso de un sistema elástico, se tiene sólo una ecuación para la longitud de onda respectiva con la que se está trabajando, y como se dijo anteriormente, dos incógnitas a encontrar. Para el caso molecular, que está mucho más estudiado que el caso de aerosoles, se conoce la relación entre ambas incógnitas. Para resolver las incógnitas debido a aerosoles, se escribe una de estas variables en función de la otra. La relación entre ellas se denomina Lidar Ratio y es un valor que puede ser obtenido utilizando otros instrumentos como un fotómetro solar.

Para la inversión de la ecuación de un Lidar elástico se utiliza el **Método de Klett-Fernald** [Klett, 1981, Klett, 1983, Fernald, F., 1984, Landulfo *et al.*, 2003, Balis *et al.*, 2000]. Se debe entender que en este caso tenemos dos parámetros desconocidos (el coeficiente de extinción y el coeficiente de retrodispersión) y sólo una ecuación, la ecuación Lidar elástica (2.16). Por esto, son necesarias dos suposiciones para obtener los perfiles de $\alpha_{aer}(z)$ y $\beta_{aer}(z)$

- La existencia de una dependendencia entre el coeficiente de extinción de extinción y backscattering, dado por el Lidar Ratio.

$$LR(z) = \frac{\alpha_{aer}(z)}{\beta_{aer}(z)}.$$

Para resolver la ecuación Lidar elástica se debe tener la información de este coeficiente o al menos un valor razonable para toda la columna atmosférica.

- Un valor de referencia conocido para el coeficiente de backscattering a una altitud determinada. En nuestro caso, se considera una altura de referencia máxima en el método, por lo que para encontrar el valor de referencia del coeficiente de backscattering se considera una región en la cual sólo esten presentes moléculas y no aerosoles, por lo cual el valor de éste sólo estará dado por la contribución molecular. Al utilizar esta referencia, en cada inversión se calibra la señal respecto a esta altura de referencia, por lo que no es necesario el uso de la constante de calibración del sistema en la ecuación Lidar 2.16.

Con estas suposiciones, la ecuación Lidar 2.16, para aplicar el método de Klett-Fernald está dada por

$$P(\lambda, z) = \frac{P_0}{z^2} \beta(\lambda, z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(\lambda, \xi) d\xi \right] \quad (2.20)$$

donde además el valor del factor de overlap se considera 1, es decir, se considera sólo la parte del perfil en la que el haz láser está completamente contenido por el campo de visión del telescopio.

Esta ecuación puede ser separada en una parte molecular y una parte debido a aerosoles de la siguiente forma

$$P(\lambda, z) = P_0(\lambda) \frac{\beta_{aer}(\lambda, z) + \beta_{mol}(\lambda, z)}{z^2} \times \left[-2 \int_0^z [\alpha_{aer}(\lambda, \xi) + \alpha_{mol}(\lambda, \xi)] d\xi \right] \quad (2.21)$$

Asumiendo que la parte molecular se puede obtener mediante datos meteorológicos o el uso de las condiciones de atmósfera estándar, disminuye el número de incógnitas

de la ecuación a dos. Esto se resuelve asumiendo un valor para el *Lidar ratio*. Pero para resolver la ecuación, como se explicó en las suposiciones, se debe utilizar un valor de calibración o referencia ($\beta_{aer}(\lambda, z_0)$) para el coeficiente de backscattering para la altura de referencia z_0 .

Después de todas estas suposiciones, se resuelve la ecuación de Bernoulli para obtener β_{aer} [Klett, 1981, Klett, 1985, Fernald, F., 1984]

$$\beta_{aer}(z) = -\beta_{mol}(z) + \frac{P(z)z^2 \exp \left[-2(LR_{aer} - LR_{mol}) \int_{z_0}^z \beta_{mol}(\xi) d\xi \right]}{\frac{P(z_0)z_0^2}{\beta_{aer}(z_0) + \beta_{mol}(z_0)} - 2LR_{aer} \int_{z_0}^z P(\xi)\xi^2 \exp \left[-2(LR_{aer} - LR_{mol}) \int_{z_0}^{\xi} \beta_{mol}(z') dz' \right] d\xi} \quad (2.22)$$

donde $LR_{mol} = \frac{8\pi}{3}$ sr es la relación extinción/backscattering Rayleigh descrito anteriormente en la Ec. 2.14.

Esta ecuación se puede resolver iterativamente ya sea asumiendo un valor de altura de referencia (z_0) máximo (integral hacia atrás) o asumiendo un valor de referencia mínimo (integral hacia delante).

El coeficiente de backscattering molecular para el aire estándar [Bucholtz, 1995, Bodhaine *et al.*, 1999] se calcula a partir de

$$\alpha_{mol}(z, \lambda, p, T) = \frac{24\pi^3(n_{aire}^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2 (n_{aire}^2 + 2)^2} \frac{6 + 3\gamma}{6 - 7\gamma} \times N_s \frac{T_0}{p_0} \frac{p(z)}{T(z)} \quad (2.23)$$

donde n_{air} es el índice de refracción del aire, γ es el factor de depolarización (γ es 0.0301, 0.0284 y 0.0273 para 350 nm, 550 nm y 1000 nm respectivamente), $N_s = 2,547 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ es la densidad de número para condiciones de atmósfera estándar a nivel de superficie ($p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$, $T_0 = 15 \text{ °C}$). Los perfiles de presión ($p(z)$) y temperatura ($T(z)$) son tomados de las medidas meteorológicas, ya sea de modelos o radiosondas. El coeficiente de backscattering molecular se calcula utilizando el Lidar Ratio molecular (Ec. 2.14).

Finalmente, a partir de la definición de Lidar Ratio (Ec. 2.4.2), se obtiene el coeficiente de extinción de aerosoles.

$$\alpha_{aer}(R) = LR_{aer} \beta_{aer}(R) \quad (2.24)$$

2.7.2. Método Combinado Elástico-Raman

El método combinado elástico-Raman, como su nombre lo dice, es un método que combina tanto valores de interés de la longitud elástica como de la inelástica, es por esto, que al realizar el cálculo del coeficiente de extinción elástico, se utilizan también valores moleculares asociados a la longitud inelástica.

El método combinado elástico-Raman [Ansmann *et al.*, 1990, Ansmann *et al.*, 1992] se utiliza para la determinación independiente del coeficiente de extinción y del coeficiente de backscattering de partículas en la atmósfera. En el caso del sistema inelástico, existen menos suposiciones, ya que al trabajar con dos longitudes de onda, se puede obtener el Lidar Ratio a partir de ellas. Al utilizar este método, se calcula una relación entre la señal lidar de backscattering elástica $P_{\lambda_0}(z)$ y la señal de backscattering inelástica $P_{\lambda_{Ra}}(z)$, disminuyendo así parámetros en el cociente.

Para el caso inelástico, se necesita que el sistema Lidar posea por lo menos un canal de medidas de backscattering elástico y un canal de medidas de backscattering inelástico. Utilizando estas dos medidas independiente obtenemos el perfil para el coeficiente de extinción de partículas [Ansmann *et al.*, 1990] y el perfil para el coeficiente de backscattering de partículas [Ansmann *et al.*, 1992].

Entonces, la ecuación Lidar para el caso Raman está dada por

$$P(\lambda_R, z) = P(\lambda)C_R(z)\frac{\beta_R(\lambda, z)}{z^2} \exp \left[- \int_0^z [\alpha(\lambda, \xi) + \alpha(\lambda_R, \xi)] d\xi \right] \quad (2.25)$$

donde $P(\lambda_R, z)$ es la potencia recibida desde la distancia z en la longitud de onda Raman λ_R , $C_R(z)$ es una función que depende del factor de overlap y de los parámetros del sistema, $\beta_R(\lambda, z) = N(z)\sigma_R(\lambda)$ es el coeficiente de backscattering Raman, donde $N(z)$ es la densidad de número atmosférica del dispersor Raman y $\sigma_R(\lambda)$ es la sección transversal de scattering Raman, α es el coeficiente de extinción en las longitudes λ y λ_R y ξ es el rango de integración.

Asumiendo ahora una dependencia del coeficiente de extinción con la longitud de onda de la forma $\alpha_{aer} \propto \lambda^{-k}$, la ecuación Lidar Raman puede ser resuelta, y se obtiene

$$\alpha_{aer}(\lambda, z) = \frac{\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N(z)}{z^2 P(\lambda_R, z)} \right] - \alpha_{mol}(\lambda, z) - \alpha_{mol}(\lambda_R, z)}{1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_R} \right)^k} \quad (2.26)$$

$$\beta_{\lambda_0}^{aer}(z) + \beta_{\lambda_0}^{mol}(z) = \left[\beta_{\lambda_0}^{aer}(z_0) + \beta_{\lambda_0}^{mol}(z_0) \right] \frac{P_{\lambda_{ref}}(z_0)P_{\lambda_0}(z)N_{ref}(z)}{P_{\lambda_0}(z_0)P_{\lambda_{ref}}(z)N_{ref}(z_0)} \quad (2.27)$$

$$\times \frac{\exp \left[- \int_{z_0}^z \left(\alpha_{\lambda_{ref}}^{aer}(\xi) + \alpha_{\lambda_{ref}}^{mol}(\xi) \right) d\xi \right]}{\exp \left[- \int_{z_0}^z \left(\alpha_{\lambda_0}^{aer}(\xi) + \alpha_{\lambda_0}^{mol}(\xi) \right) d\xi \right]}$$

donde N_{ref} es la densidad de número de las moléculas de nitrógeno, k se denomina *Coefficiente de Angstrom* y describe la dependencia con la longitud de onda del coeficiente de extinción de las partículas, z_0 es la altura de referencia desde donde se considera atmósfera libre de aerosoles y se ha asumido que $d\sigma_R(\lambda)/dz = 0$.

La densidad de número del nitrógeno (N_{ref}) y todos los valores moleculares de extinción y backscattering (α_{mol} y β_{mol}) son calculados de la misma forma que para el método elástico (Ec. 2.23).

En el caso de inversión de señales inelásticas es importante considerar que el factor de solapamiento de ambas señales sea idéntico, lo cual se cumple generalmente para sistemas lidar Raman.

Durante el día, solo se pueden obtener datos elásticos mayoritariamente, debido a que la luz de fondo provista por el cielo genera mucho ruido en la ya baja señal Raman.

Exponente de Angstrom

El exponente de Angstrom k [Angstrom A., 1964, Ansmann *et al.*, 2005] es uno de los coeficientes que se utilizan para resolver la ecuación lidar inelástica. Este exponente describe la dependencia espectral de las propiedades ópticas de los aerosoles. Además, el coeficiente de Angstrom permite conocer el tamaño medio de las partículas de aerosol que interactúan con la radiación solar cuando ésta atraviesa la atmósfera. Altos valores del coeficiente de Angstrom indican mayor presencia de partículas pequeñas, y valores cercanos a cero, indican mayor presencia de partículas grandes.

Una de las formas de calcular el coeficiente de Angstrom es utilizando el coeficiente de extinción para dos longitudes distintas y su relación con las longitudes de onda

$$k = - \frac{\ln [\alpha_{aer}(\lambda_R, z)/\lambda_0, z]}{\ln \lambda_R/\lambda_0} \quad (2.28)$$

Para aerosoles y gotas de agua de diámetros comparables con la longitud de onda de medida, se utiliza $k = 1$, mientras que para cristales de agua, de diámetros mucho mayores que la longitud de onda de medida $k = 0$. [Ansmann *et al.*, 1992]. Los valores de este coeficiente pueden ser obtenidos utilizando las medidas de un fotómetro solar.



3

Metodología para el Análisis de Datos Lidar

Al medir con un Sistema Lidar, la señal obtenida es una curva característica de un perfil vertical de atenuación de la radiación en la atmósfera, y que al ser analizada nos permite conocer características ópticas específicas de las partículas y moléculas que componen la columna atmosférica en observación. Para esto, la señal adquirida debe ser procesada con alguno de los métodos de inversión presentados en el capítulo anterior, que consideran tanto las características del sistema como las características atmosféricas para obtener las propiedades ópticas de interés de los aerosoles atmosféricos.

Las medidas realizadas fueron obtenidas utilizando el sistema Lidar denominado Lidar-CEFOP, el primer sistema Lidar construido en el país. Este sistema en un principio correspondió a un sistema elástico de un solo canal (532 nm) pero actualmente es un sistema multicanal (355 nm, 387 nm, 408 nm y 532 nm). Para el análisis de las señales Lidar fueron desarrollados e implementados dos códigos con los respectivos algoritmos de inversión (Klett y Elástico-Raman), los cuales permiten obtener los parámetros de interés en cada caso, es decir, para el caso elástico, los valores de los coeficientes de extinción y backscattering de aerosoles en 532 nm y para el caso Raman, además de lo anterior, los valores de coeficiente de extinción y backscattering de aerosoles en 355 nm, el coeficiente de extinción para 387 nm y el factor de mezcla de vapor de agua. Todos estos parámetros se obtienen con una resolución espacial de 7.5 m, una resolución temporal variable y cubriendo un rango de alturas desde 180 m a 6 km aproximadamente.

A continuación, se presentan las características del sistema utilizado y la descripción de los algoritmos de inversión que permiten obtener medidas de los coeficientes ópticos de los aerosoles.

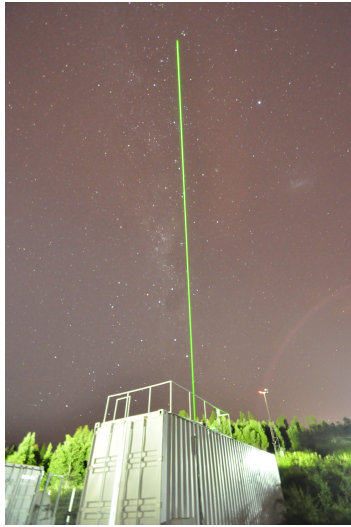


Figura 3.1: Medidas Nocturnas en el Observatorio Lidar-CEFOP

3.1. Sistema Lidar Elástico

El primer sistema Lidar construido fue un Lidar Coaxial con un sólo canal correspondiente a 532 nm para la medición de los aerosoles troposféricos. Este sistema utilizaba un láser de 2 W de potencia y las medidas en promedio alcanzaban los 10 km de altura. Para la adquisición de los datos se utilizó un sistema LICEL conectado al laser, que permite conocer la distancia desde la cual viaja la señal de backscattering. Para el análisis de la señal medida (Fig. 3.2), se utiliza el método de Klett-Fernald descrito en el capítulo anterior, que permite obtener los parámetros ópticos de extinción y backscattering de aerosoles en la columna atmosférica. A continuación, se presentan las características del sistema Lidar-Cefop elástico y la descripción del método utilizado en el algoritmo de inversión de señales elásticas implementado para este sistema.

3.1.1. Descripción del Sistema Lidar Elástico

El sistema Lidar se encuentra ubicado en un contenedor transportable con control de temperatura y humedad, en dependencias de la Universidad de Concepción, en uno de los lugares más limpios de la ciudad, a 170 msnm y a 11.6 km en línea recta de la costa del Océano Pacífico. Esta locación además se encuentra lejana de emisiones directas de la zona industrial. En la Figura 3.3 se muestra la ubicación geográfica del sitio experimental.

La señal Lidar se midió usando el sistema elástico de una longitud de onda. El sistema se encuentra a nivel de superficie, entrega datos de la columna atmosférica justo sobre él y posee una configuración coaxial con una resolución espacial de 7.5 m. Para la adquisición se usa una combinación de señales análoga y de fotoconteo utilizando

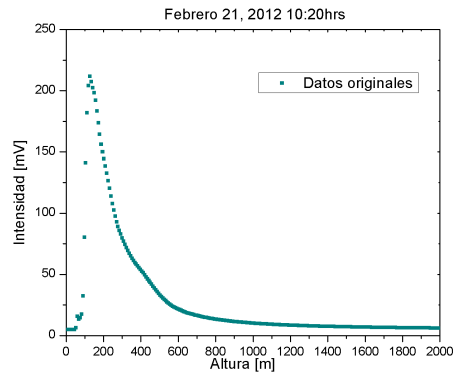


Figura 3.2: Señal Original medida por el sistema Lidar

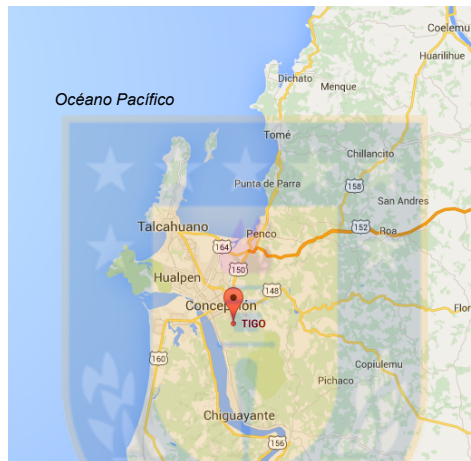


Figura 3.3: Ubicación geográfica de la ciudad de Concepción y de la estación Lidar (Google maps)

un sistema LICEL. La potencia de salida del láser es 320 mJ por pulso en 532 nm y 10 Hz. Todas las características del sistema están resumidas en la Tabla 3.1.

3.1.2. Algoritmo de Inversión de Datos Lidar Elástico

Para el análisis de los datos del sistema Lidar elástico, se desarrolló un algoritmo de inversión basado en el método Klett-Fernald descrito en 2.7.1 Este método se utiliza para sistemas de un canal, no considera multiple scattering y principalmente se utiliza para medidas diurnas, debido a que a estas horas el ruido de fondo es menor en este tipo de medidas. Un diagrama del funcionamiento del algoritmo se muestra en la figura (3.5).

La validación del algoritmo desarrollado e implementado para el análisis de los datos Lidar del sistema elástico se realizó por comparación, como se describirá con mayor detalle en el capítulo 5.

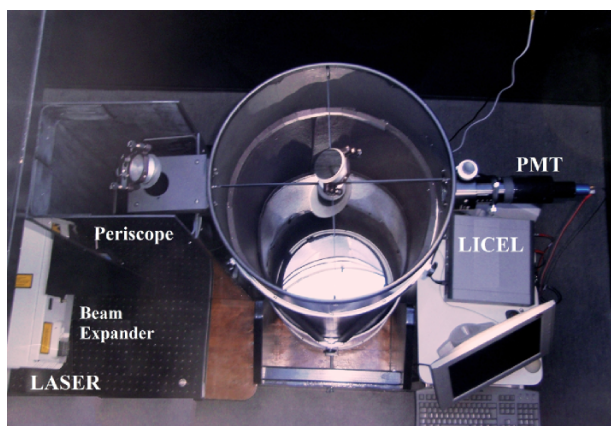


Figura 3.4: Montaje del Sistema Lidar-CEFOP (Vista superior)

Laser	Q-switched Nd:YAG
Longitud de Onda Transmitida	532 nm
Energía del Pulso Láser	320 mJ (@532)
Duración del Pulso	7 ns
Divergencia del haz láser	0.5 mrad
Tasa de repetición del Pulso	10 Hz
Expansor de Haz	5X
Telescopio	Newtoniano
Diámetro Espejo Primario	40.64 cm
Distancia Focal	182.9 cm
FOV	3 mrad
Detector	PMT (300 -900 nm)
Filtro de Interferencia	3 nm FWHM (@532)
Adquisición de Datos	LICEL
Rango de Resolución	7.5 m

Tabla 3.1: Parámetros Lidar Elástico

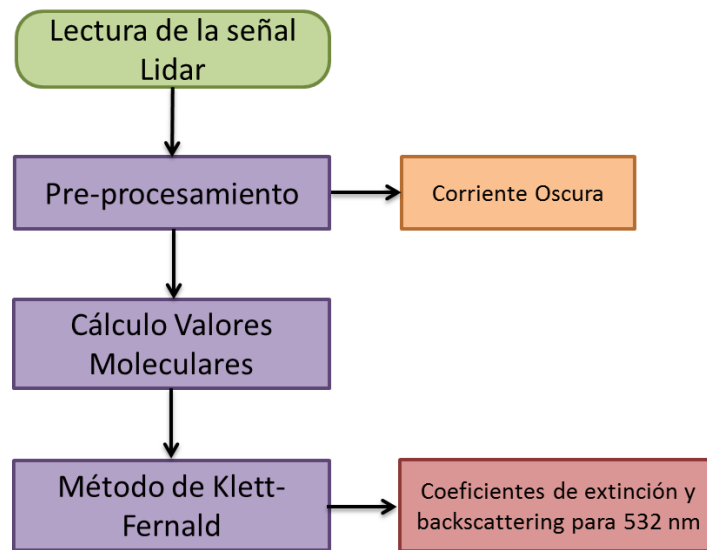


Figura 3.5: Diagrama de Bloques del Algoritmo de Inversión Elástico desarrollado.

Pre-Procesamiento

Para utilizar los datos obtenidos con el sistema Lidar en el algoritmo de análisis, se deben realizar una serie de correcciones a las señales recibidas para ser procesadas. Estas correcciones dependen del canal con el que se trabaje. En el caso de los canales análogos se realizan dos correcciones:

- Corriente Oscura:** Para la detección de la señal Lidar se utilizan tubos fotomultiplicadores, que convierten la señal de luz en corriente. La corriente oscura es una corriente eléctrica relativamente pequeña que fluye a través de los detectores ópticos en ausencia de cualquier señal o luz de fondo y tiene su origen en los pares electrón-hueco generados térmicamente. La corriente oscura debe ser corregida para la calibración del sistema si éste necesita medidas de potencia óptica precisas, como en el caso del sistema Lidar.

La corrección de la corriente oscura consiste en sustraer de los datos el ruido por defecto de la medida. Este ruido se obtiene tomando un conjunto de medidas con la fuente laser apagada. Esta sustracción se realiza en todos los canales a utilizar.

- Corrección de "Bin Shift":** Los canales análogos tienen un retraso en la medición respecto a los canales de fotoconteo, por lo que para que las medidas coincidan se debe eliminar un número de bins de los canales análogos. Para obtener el valor de la cantidad de bins se calcula una correlación entre el canal análogo y el de fotoconteo, dejando fijo el de fotoconteo y moviendo positiva y negativamente el canal análogo hasta obtener una correlación máxima. El número de bins de este

corrimiento es el número de bins que deben ser eliminados. En el caso de este sistema, deben ser eliminados los primeros 9 bins.

En el caso de los canales de fotoconteo, para el caso de un sistema elástico, sólo se necesita una corrección:

- **Corrección de Tiempo Muerto:** Esta corrección es inherente a los sistemas de detección, ya que en el proceso de detección se necesita una cantidad de tiempo para discriminar y procesar los eventos, entonces, si ocurriese un segundo evento durante ese tiempo, no podrá ser contabilizado [Kovalev & Eichinger, 2004]. El tiempo mínimo que se requiere para contabilizar ambos eventos se conoce como "tiempo muerto". El valor de esta corrección es entregada por el fabricante (LICEL), y en este caso es de 4.4 ns.

Cálculos Moleculares

Para el cálculo de los datos moleculares, se utilizan los métodos propuestos por Bucholtz [Bucholtz, 1995] y Bodhaine [Bodhaine *et al.*, 1999] (Ec. 2.23). En estos métodos lo que se busca es una señal de backscattering molecular, la cual se calcula utilizando valores de temperatura y presión en perfil. Éstos son obtenidos utilizando un modelo de mesoescala (WRF), cuyos datos están disponibles on line. Este modelo es un sistema numérico de mesoescala que permite simular variables meteorológicas en el tiempo y en el espacio.

La señal de backscattering molecular obtenida es comparada con el perfil de los datos medidos (Fig. 3.6), para conocer la altura hasta la cual se está recibiendo señal de aerosoles, así, se conoce la altura máxima de referencia que luego será utilizada en el método de inversión. Esto es lo que se conoce como Ajuste Rayleigh, donde se realiza un ajuste lineal entre la señal lidar, $P(z)$ y la señal molecular $P_{mol}(z)$ en un rango dado de alturas, para las cuales se considera que la atmósfera es sólo molecular.

Para realizar este ajuste se utiliza la siguiente ecuación lineal

$$P(z) = A * P_{mol}(z) + B \quad (3.1)$$

donde A representa el escalamiento que se realiza a la señal original y B representa el *background* de la señal.

De esta forma, la señal medida es ajustada utilizando la señal molecular, y el punto donde las señales se solapan, representa la altura donde la atmósfera se puede considerar sólo molecular o lo que es lo mismo, atmósfera libre de aerosoles.

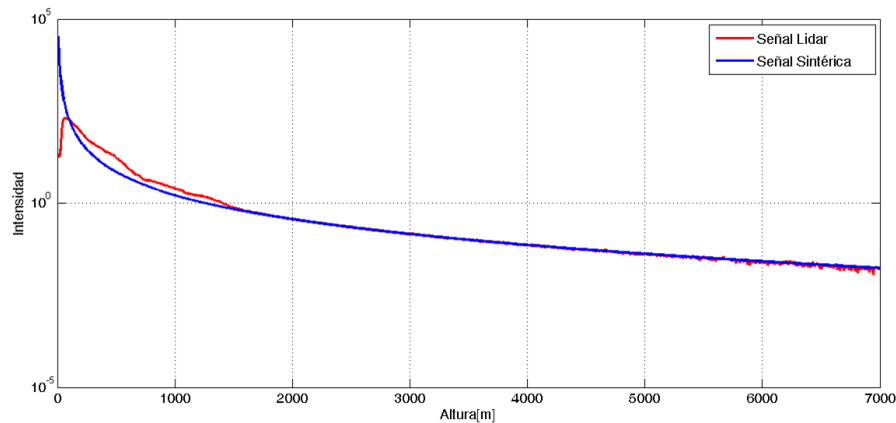


Figura 3.6: Superposición de Señal Lidar y Señal Sintética molecular

Parámetros Obtenidos

En el capítulo anterior se presentó la ecuación Lidar, que al poseer dos incógnitas, debe ser resuelta mediante métodos de inversión para obtener los dos parámetros de interés: coeficiente de extinción y coeficiente de backscattering. En el caso elástico, la longitud de onda de las medidas es la misma longitud de onda de emisión, por lo que para resolver, utilizando el método de Klett-Fernald, se debe fijar un valor para el Lidar Ratio. A pesar de que este valor puede ser obtenido utilizando sistemas complementarios como el fotómetro solar, en el momento en que se realizaron estas medidas no se contaba con este instrumento, por lo que el valor del Lidar Ratio debió ser supuesto. El valor del Lidar Ratio utilizado para el análisis de los datos del sistema elástico se asumió y fijó en 35 sr. Este valor se obtuvo en base a la bibliografía existente ([Balis *et al.*, 2000]) respecto a ciudades con características geográficas y de polución similares a Concepción. Además, las medidas realizadas por el fotómetro solar desde Octubre de 2014 confirman que el AOD del sitio de medidas coincide con un Lidar Ratio de 35 sr, lo que corresponde a una mezcla de aerosoles continentales y marinos limpos. Como comparación se puede tomar el caso de Sao Paulo, ciudad con muchos aerosoles, gran cantidad de industrias y una población muy grande, cuyo Lidar Ratio es 60 sr.

Después de pre-procesar la señal y conocer la altura máxima de Klett (altura desde la cual se puede considerar la atmósfera libre de aerosoles) a través de la superposición de la señal rango corregida Lidar con la señal molecular, se aplica el método de inversión.

- **Coefficiente de Backscattering** Utilizando la ecuación 2.7.1, se obtiene el perfil del coeficiente de backscattering para aerosoles. En el caso del sistema Lidar Cefop, las medidas en promedio alcanzan una altura de 10 km. En la sección de análisis se presentarán graficas de las medidas obtenidas con este método
- **Coefficiente de Extinción** El coeficiente de extinción se obtiene una vez obte-

nido el perfil del coeficiente de backscattering, utilizando la relación entre este coeficientes y el Lidar Ratio, tal como se demostró en la Ec. 2.7.1.

3.2. Sistema Lidar Inelástico

Luego del desarrollo de la primera etapa del Sistema Lidar, el grupo Lidar Cefop trabajó en el desarrollo de un sistema Lidar de 4 canales (Lidar Raman), para, además de medir aerosoles, obtener perfiles de nitrógeno y vapor de agua. Las primeras medidas con este sistema se realizaron en septiembre de 2013. Para el análisis de estas medidas, se mejoró el algoritmo de análisis de datos elásticos, se desarrolló e implementó la inversión de los datos inelásticos, se agregó el cálculo del factor de overlap del sistema y la mejora en el pre-procesamiento de los datos que luego se incluiría en ambos algoritmos.

3.2.1. Descripción del Sistema Lidar Raman

Las principales diferencias entre el sistema Lidar elástico utilizado anteriormente y el sistema Lidar Raman actual es el uso de un nuevo láser, más potente y la inclusión de más canales. El sistema original poseía sólo un canal de adquisición elástico (532 nm) y que era medido utilizando tanto el canal análogo como el de fotoconteo que posee el sistema de adquisición LICEL. El nuevo sistema Lidar Raman posee 4 canales: dos canales elásticos (355nm, 532 nm) y dos canales inelásticos (387nm, 408 nm); los canales elásticos ahora sólo son medidos utilizando canales análogos en el sistema de adquisición, y los canales inelásticos se miden utilizando sólo los canales de fotoconteo del sistema de adquisición LICEL. Es así como se logró un sistema de 4 canales con sólo dos tarjetas de adquisición. Las características del sistema inelástico se presentan en la Tabla 3.2.

En este nuevo sistema, se utilizan las longitudes de 355 nm y 532 nm para obtener parámetros ópticos de aerosoles (extinción y backscattering). En el caso de 532 nm, se sigue utilizando el método de Klett-Fernald, pues no hay longitudes de onda inelásticas asociadas a ella. En el caso de 355 nm, los parámetros ópticos de aerosoles se obtienen utilizando el método combinado elástico-Raman, y además, se obtiene el coeficiente de extinción para el nitrógeno (387 nm) y el factor de mezcla de vapor de agua para lo cual se utilizan las longitudes de 387 nm y 408 nm.

3.2.2. Algoritmo de Inversión de Datos Lidar Inelástico

La ventaja de utilizar un sistema Lidar Raman es la determinación independiente de los coeficientes de extinción y backscattering de aerosoles, sin necesidad de asumir valores como en el caso elástico, donde hay que asumir un valor para el *Lidar Ratio*. En este método, se realizan dos mediciones independientes a distintas longitudes de onda (en nuestro caso 355 nm y 387 nm), con las que se obtienen las señales lidar de

Laser	Q-switched Nd:YAG
Longitudes de Onda Emitidas	1064 nm, 532 nm, 355 nm
Energías	850 mJ @1064 nm 400 mJ @400 nm 185 mJ @355 nm
Voltaje de Descarga flashlamp	16.30 V
Duración del Pulso	4.5 ns
Diámetro del haz láser	9mm
Divergencia del haz láser (antes de la expansión)	0.5 mrad
Divergencia del haz láser (después de la expansión)	0.1 mrad
Tasa de repetición del pulso láser	10 Hz
Duración del Pulso	4.5 ns
Expansor de Haz	5X
Telescopio	Newtoniano
Diámetro del espejo primario	40,64 cm
Distancia Focal	182,9 cm
FOV	3 mrad
Detector	PMT (300 -900 nm)
Filtro de Interferencia	3 nm FWHM (@532)
Adquisición de Datos	LICEL
Rango de resolución	7.5 m

Tabla 3.2: Parámetros Lidar Raman

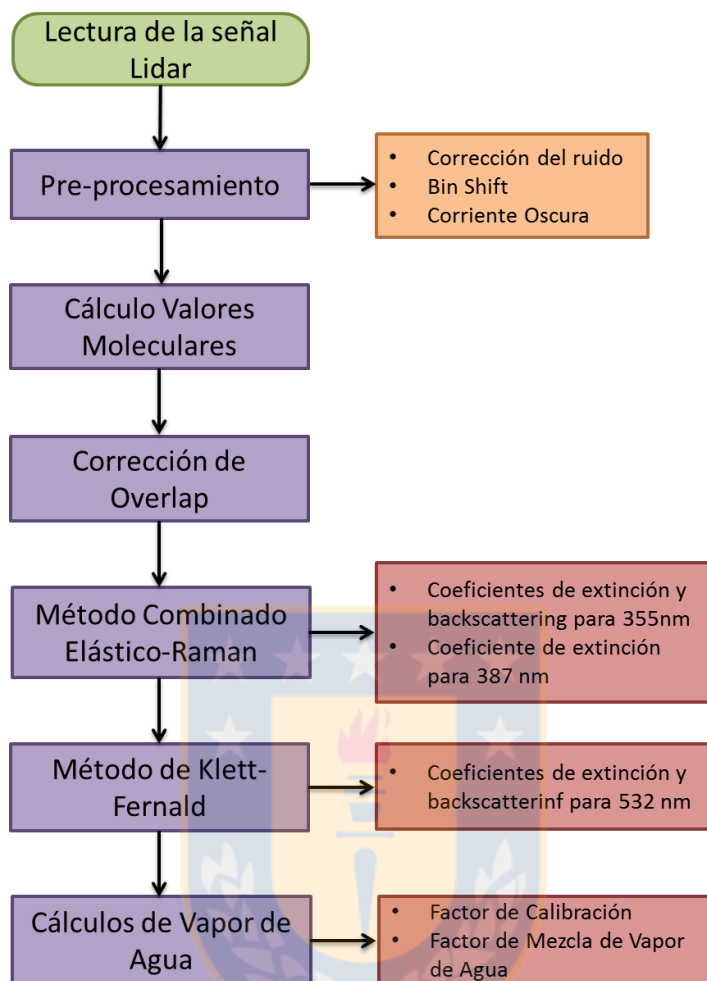


Figura 3.7: Diagrama de Bloques del Algoritmo de Inversión Inelástico desarrollado.

backscattering elástico e inelástico ($P_{\lambda_0}(z)$ y $P_{\lambda_{Ra}}(z)$ respectivamente). Utilizando estas dos señales lidar, se obtienen el coeficiente de extinción de aerosoles, el coeficiente de backscattering de aerosoles y el coeficiente de extinción del nitrógeno.

La diferencia al momento de procesar los datos se basa principalmente en el tipo de interacción del laser y las partículas de interés. Los datos debido a scattering elástico siguen siendo procesados utilizando el método de Klett-Fernald. En el caso de los datos debidos a scattering inelástico, los datos fueron procesados utilizando el método combinado Elástico-Raman [Ansmann *et al.*, 1992], el cual hace uso de la señal elástica más cercana que se posea respecto a la señal inelástica de interés.

En la Fig. 3.7 se presenta un diagrama de bloques donde se muestra el funcionamiento del algoritmo para análisis de señales utilizando el método combinado elástico-Raman.

Pre-procesamiento

En el pre procesamiento, los datos son corregidos para luego ser utilizados en los métodos de inversión correspondientes. Dependiendo de si es un canal análogo o de fotoconteo se aplican distintas correcciones.

Para el caso de los canales análogos (355nm y 532 nm), al ser las longitudes de onda del backscattering elástico, se corrigen de la misma forma que en el caso del Lidar elástico, es decir, se corrigen en corriente oscura (*dark current*) y en el retraso que tienen respecto a los canales de fotoconteo (*bin shift*). Para el caso de los canales de fotoconteo se aplica la corrección de tiempo muerto (*Dead Time Correction*) que es el mínimo tiempo en que el sistema puede discriminar dos eventos, de forma que ambos sean contados [Kovalev & Eichinger, 2004]. Para realizar esta corrección se utiliza el valor que entrega el sistema de adquisición de datos LICEL, que es de 4.4 ns.

Cálculos Moleculares

Para el cálculo de la señal molecular y para conocer la altura desde la cual la atmósfera se puede considerar libre de aerosoles, se utiliza el mismo método utilizando para el caso elástico, es decir, se calcula la señal rango corregida y se ajusta linealmente en un rango determinado con la señal molecular obtenida a través de datos meteorológicos obtenidos con el modelo WRF.

Cálculos del Factor de Overlap

Para los cálculos del factor de overlap, que entrega la altura desde la cual el sistema está midiendo y corrige la señal hasta dicha altura, se utilizó el método propuesto por Wandinger [Wandinger *et al.*, 2002]. Este es un método iterativo que permite obtener el perfil de overlap de la señal comparando el perfil de la señal medida con un perfil de la señal corregido, ya que considera que la señal de aerosol, corregida sólo en rango, es principalmente una función del efecto combinado del backscattering total y el overlap rango dependiente.

El método se basa en que la solución para el coeficiente de backscattering obtenido utilizando el método de Klett-Fernald para señales elásticas y el coeficiente de backscattering utilizando el método Raman para señales inelásticas, contienen información incompleta del overlap. Por lo que asumiendo que el overlap en ambos casos es el mismo, es posible obtener el factor de overlap completo utilizando ambas señales.

La relación que se obtiene para el overlap de esta forma, está dada por las diferencias relativas entre las soluciones de Klett y Raman

$$\frac{\beta_{Raman}(z) - \beta_{klett}(z)}{\beta_{Raman}(z) + \beta_{0,M}(z)} \propto \frac{P_0(z)O(z)^{-1}z^2}{P_0(z)O(z)^{-1}z^2} \propto 1 - O(z) \quad (3.2)$$

Esta relación es la que se itera, corrigiendo en cada iteración la señal elástica, de la siguiente forma

$$P_{0,i+1} = P_{0,i}(z)[1 + \Delta O_i(z)] \quad (3.3)$$

donde

$$\Delta O_i(z) = \frac{\beta_{Raman(z)} - \beta_{klett,i}(z)}{\beta_{Raman(z)} + \beta_{0,M}(z)} \quad (3.4)$$

El número de iteraciones para remover completamente el efecto del overlap oscila entre 10 y 12 veces [Wandinger *et al.*, 2002]. Finalmente, al comparar la señal medida con la señal corregida, se obtiene el perfil del factor de overlap.

El perfil de overlap se considera sólo para los primeros metros del perfil vertical, ya que luego del máximo de la señal de potencia recibida se asegura que el láser está completamente contenido en el campo de visión del láser, por lo que el factor de overlap puede ser considerado 1 a partir de ese punto. La altura desde donde se considera el overlap igual a 1 en el sistema Lidar-CEFOP se encuentra aproximadamente en 100m.

Cálculos de Coeficientes Ópticos

Para el caso de las señales inelásticas, sólo se obtienen el coeficiente de extinción, y éste se obtiene a través de la señal elástica más cercana. El método combinado elástico-Raman explicado en el Capítulo 2 es el que se utiliza.

- **Cálculos del coeficiente de extinción de la señal asociada a un canal inelástico**

Para el caso del coeficiente de extinción inelástico, se debe conocer cómo varía el coeficiente de Angstrom, el cual es entregado por el fotómetro solar, o por algún fotómetro cercano a la ubicación del sistema. Existe una red de monitoreo con fotómetros solares (AERONET) que pertenece a la NASA y que permite tener acceso a datos medidos en diferentes estaciones en el mundo, en el caso de no poseer el instrumento.

El exponente de Angstrom (Ec. 2.28) al ser una relación entre los coeficientes de extinción para dos longitudes de onda, permite conocer el coeficiente de extinción del canal inelástico a través del coeficiente de extinción del canal elástico. Por lo que el exponente de Angstrom utilizado debe ser el calculado utilizando longitudes de onda lo más cercanas posibles a las que utiliza el sistema.

En nuestro caso, se utilizan las ecuaciones presentadas en el capítulo 2 para la obtención de los coeficientes de extinción elástica e inelástica (α_{aer}^{355} , α_{387}).

- **Cálculos de coeficientes ópticos relacionados a un canal elástico**

El procedimiento para el cálculo de coeficientes de extinción y backscattering sólo elástico, es el mismo algoritmo escrito basado en el método de inversión Klett-Fernald.

Medidas de Vapor de Agua

Además de la obtención de parámetros ópticos de aerosoles, uno de los resultados más importantes del lidar Raman es la obtención de la *Razón de Mezcla de Vapor de Agua*, que es la medida de la razón entre el vapor de agua y el aire seco.

Para obtener este parámetro, se calcula la razón entre la señal de vapor de agua y una señal de referencia [Ansmann *et al.*,1992], ésta última puede ser nitrógeno u oxígeno. Entonces, la razón de mezcla se obtiene como

$$m(z) = K_m \frac{P_{\lambda_{H_2O}}(z) \exp\left(-\int_0^z [\alpha_{\lambda_{ref}}^{aer}(\xi) + \alpha_{\lambda_{ref}}^{mol}(\xi)] d\xi\right)}{P_{\lambda_{ref}}(z) \exp\left(-\int_0^z [\alpha_{\lambda_{H_2O}}^{aer}(\xi) + \alpha_{\lambda_{H_2O}}^{mol}(\xi)] d\xi\right)} \quad (3.5)$$

donde K_m es una constante de calibración que se obtiene utilizando la columna de vapor de agua integrada que entregan los datos meteorológicos.

Para obtener el factor de mezcla, se debe calcular la constante de calibración de la ecuación K_m . Como dice su nombre, la constante de calibración es una constante, por lo que se obtiene despejándola de la ecuación. Para ello, se utilizan datos meteorológicos, los cuales se obtienen utilizando nuevamente los datos obtenidos con el método de mesoescala WRF. Entonces, de los datos meteorológicos, se obtiene la columna de vapor de agua integrada. El dato que interesa al calcular el factor de mezcla es la columna integrada de Vapor de Agua que en la ecuación está dada por $m(z)$. Calculando este valor, despejamos la constante K_m y la calculamos utilizando tanto los datos moleculares como los datos de aerosoles obtenidos con el Lidar. Para finalmente obtener el valor de la constante, que podremos reutilizar para calcular finalmente el factor de mezcla de vapor de agua en perfil.



4

Análisis de señales Lidar elásticas

Durante el año 2012, se iniciaron las medidas continuas con el sistema Lidar-CEFOP. Durante este período el sistema con el que se trabajó fue un sistema elástico monocanal, es decir, que emitía una sola longitud de onda, la fue de 532 nm.

Las medidas que se presentan y analizan en este capítulo se realizaron entre el 29 de Febrero y el 12 de Septiembre de 2012, cubriendo así todas las estaciones del año, lo que permitió que se pudiese realizar la primera caracterización estacional de las propiedades ópticas de aerosoles en la ciudad de Concepción.

4.1. Medidas Realizadas

Como se mencionó anteriormente, las medidas realizadas son del período comprendido entre el 29 de Febrero hasta el 12 de Septiembre de 2012. Aunque las horas de medida del sistema han variado dependiendo de la condición meteorológica de cada día, a continuación se presentan sólo las medidas realizadas entre las 08:00 hrs y las 24:00 hrs. Este período se escogió para evitar la saturación de la señal debido a la alta humedad en el lugar de medida [Jimenez 2014]. En la Tabla 4.1 se muestra el total de días con medidas dentro de este período, además de los días procesados exitosamente para cada mes.

Como muestra la Tabla 4.1, durante los meses correspondientes a finales del otoño e invierno, las medidas disminuyeron considerablemente, esto es debido a que el sistema Lidar es un sistema abierto y en contacto con el exterior, por lo que no se realizan medidas en días con muy alta humedad atmosférica, y además se necesita cielo despejado

	F	M	A	M	J	J	A	S	TOTAL
Medidas	16	19	14	8	7	5	4	9	82
Procesados	2	12	5	2	2	2	3	4	32

Tabla 4.1: Número de días de medida realizadas cada mes y total en el período Febrero a Septiembre de 2012.

para que las medidas sean procesadas.

Las medidas sólo se realizaron hasta septiembre de dicho año, debido al inicio del proceso de mejora del sistema para tener el sistema multicanal con el que se trabaja actualmente. Las medidas de este período fueron procesadas utilizando el algoritmo de inversión de medidas elásticas basado en el método de inversión de Klett-Fernald (sección 2.7.1) para finalmente realizar el análisis respectivo para mostrar la variación de los coeficientes ópticos de extinción y backscattering desde finales del verano austral hasta comienzos de la primavera austral en 2012.

Cada medida del sistema tiene una duración de 200 segundos, este es el tiempo de integración para obtener una curva de potencia de retorno. Cada una de estas curvas es procesada utilizando los respectivos datos meteorológicos correspondientes a la hora de la medida, para finalmente obtener un conjunto de la misma cantidad de medidas, pero de coeficientes de extinción y backscattering de aerosoles.

Para evaluar los perfiles y obtener el comportamiento estacional de los aerosoles, se calculó un *perfil promedio* de todas las medidas realizadas en la estación respectiva. Este perfil promedio incluye todos los perfiles, sin importar si poseen aerosoles sólo dentro de la capa límite planetaria (PBL) o más arriba de ella. Es por esto, que para todos los perfiles se considera la misma altura máxima (6000 m) para aplicar el método de inversión de Klett-Fernald. Sobre esta altura, se considera que la atmósfera sólo se compone de moléculas y la cantidad de aerosoles es despreciable, lo que se denomina atmósfera libre (de aerosoles).

En las Figuras 4.1 y 4.2, se muestran los perfiles promedio del coeficiente de extinción y backscattering para cada una de las estaciones: finales del verano, otoño, invierno y principios de la primavera, junto con sus barras de error (representadas por la sombra gris que envuelve las señales). Estas barras de error fueron calculadas utilizando la desviación estandar de las señales, por lo que representa la variación atmosférica. Los perfiles promedio fueron calculados cumpliendo que los valores de los coeficientes de extinción y backscattering deben ser cero, o mayores que cero incluso dentro de las barras de error, si su comportamiento no cumplía dicha condición los perfiles fueron excluidos del cálculo del perfil promedio.

Considerando que después de la revisión de los perfiles de extinción y backscattering no se presentó ninguna perturbación a alturas mayores a los 3000 m, los perfiles de las Figuras 4.1 y 4.2 se presentan hasta dicha altura.

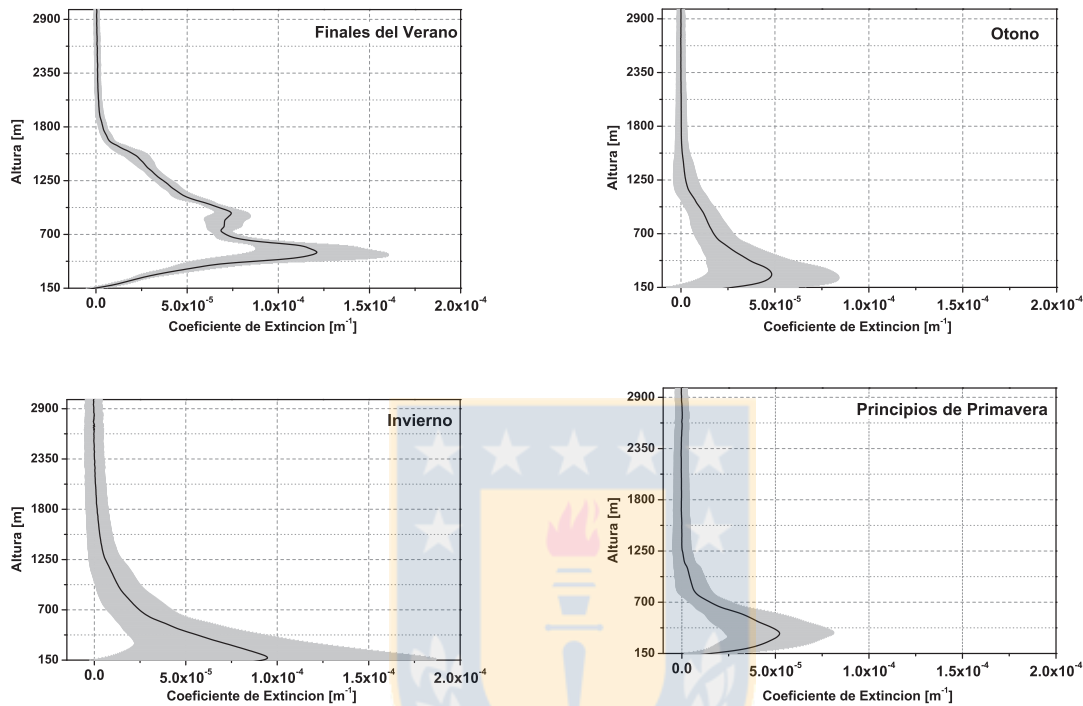


Figura 4.1: Perfiles Promedio del Coeficiente de Extinción de los aerosoles en las diferentes estaciones del año para la ciudad de Concepción, desde Febrero a Septiembre de 2012.

Como se ve de la Figuras 4.1 y 4.2, la mayor desviación de las propiedades ópticas de interés ocurrió durante los meses de invierno. Esto se explica por la alta variación de la humedad durante estos meses del año. Utilizando los datos meteorológicos obtenidos mediante el modelo WRF para los meses de invierno del año 2012, se obtuvo que la humedad relativa durante este período varió desde un 40 % a un 96 % para una altura de 250 m. Además, la menor desviación de los coeficientes de extinción y backscattering de aerosoles ocurrió durante los meses de verano. De los datos meteorológicos para los meses de verano, para la misma altura de 250 m desde el nivel del suelo, la variación en la humedad relativa fue de 60 % hasta un 80 %. Es por este motivo que se considera que las barras de error en los perfiles promedios, también están asociadas a las variaciones de humedad en cada caso, por lo que indican una relación entre esta variación de humedad y los aerosoles higroscópicos locales.

De las gráficas de los coeficientes de extinción y backscattering, se obtiene además la

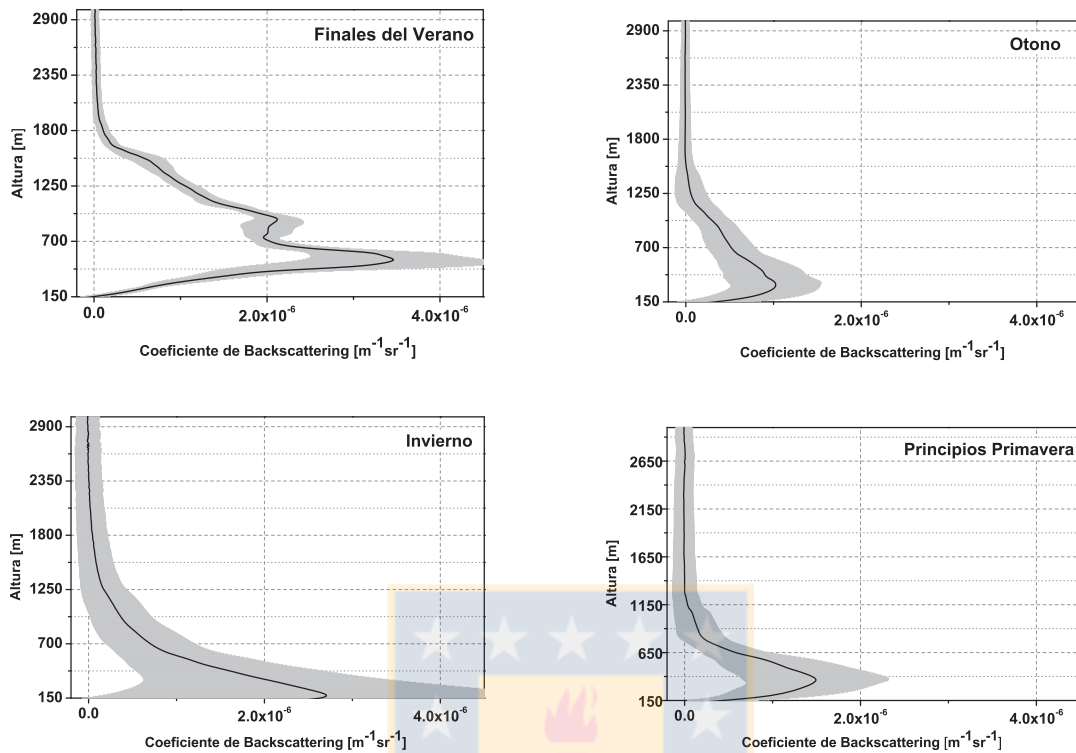


Figura 4.2: Perfiles Promedio del Coeficiente de Backscattering en las diferentes estaciones del año para la ciudad de Concepción, desde Febrero a Septiembre de 2012.

altura desde la cual la atmósfera se considera libre de aerosoles, siendo el valor de ésta dependiente de la estación del año. Esta altura se reconoce porque es el punto donde la señal se anula. Para el caso del verano, se considera la atmósfera libre de aerosoles a partir de 2000 m, mientras que para la primavera, la atmósfera estará compuesta principalmente por moléculas a partir de 1100 m. De forma análoga a lo ocurrido con la humedad, los valores de la altura desde donde se considera atmósfera libre (de aerosoles), es mayor para los meses del verano (donde hay menos variación de la humedad), y el valor comienza a decrecer en otoño, hasta llegar a su valor mínimo en el invierno, y luego comienza a aumentar nuevamente en primavera. Además, la dependencia estacional de los aerosoles también se puede demostrar con la ubicación de la capa de aerosoles que se mide directamente sobre el sistema, la cual tiene un valor máximo en 530 m (sobre el nivel del sistema) durante el verano, para disminuir hasta 170 m en el invierno, y luego aumentar nuevamente en la primavera hasta 370 m. Esto se podría explicar debido a que en los meses de primavera y verano, las temperaturas son mayores y la humedad más baja, por lo que los aerosoles alcanzan mayores alturas que en los meses de otoño e invierno.

Para complementar el análisis de las medidas, se determinó el origen de los aeroso-

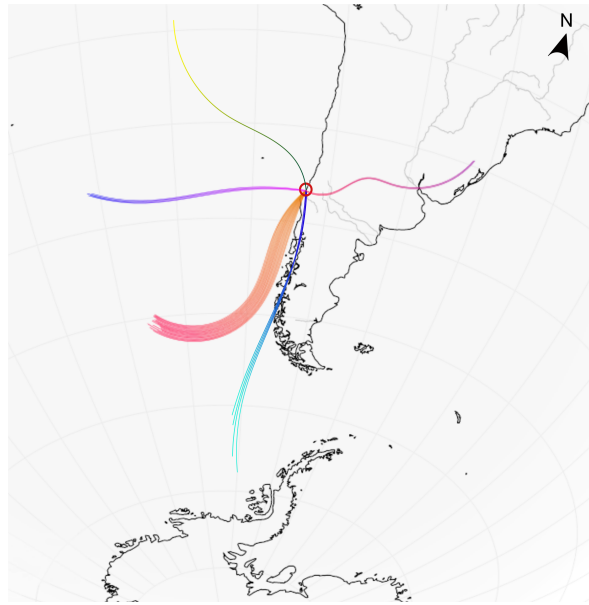


Figura 4.3: Resumen de las retrotrayectorias que arribaron a Concepción durante el período entre Febrero y Septiembre de 2012

les a través del cálculo de las retrotrayectorias de las masas de aire que arribaban a la ciudad de Concepción. Para esto, se utilizando modelos numéricos que a partir de los datos de hora, fecha y ubicación, calculan el recorrido previo en el tiempo de las masas de aire que llegan a la ubicación dada. La representación de estas retrotrayectorias en un mapa, permiten visualizar si existen actividades de generación de aerosoles a lo largo de la trayectoria. En nuestro caso, el grupo Lidar-CEFOP utilizó el modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [Draxler & Rolph, 2003] (NOAA-ARL) para calcular estas retrotrayectorias.

Realizando el análisis de todas las retrotrayectorias de las masas de aire que llegaron a Concepción durante ese período utilizando HYSPLIT, aproximadamente el 90 % de las masas de aire que llegaron desde alturas de 500 m, 1000 m y 1500 m corresponden a flujos que vienen desde el sur-oeste, es decir, desde el Océano Pacífico y la Antártica, mientras que el otro 10 % de las masas vienen desde el continente, pasando por reservas naturales, bosques, lagos e incluso la cordillera antes de llegar al lugar de medición. Es por esto que se puede considerar que los perfiles obtenidos en las Figuras 4.1 y 4.2 son representativos de una tropósfera con una baja carga de aerosoles urbanos, debido a que principalmente está compuesta por aerosoles marinos provenientes de las masas de aire que vienen desde el sur-oeste de Concepción.

Para una mejor comprensión del comportamiento de los aerosoles durante el día, en la Fig. 4.4 se presentan una serie de tiempo representativa del coeficiente de backscattering para cada una de las estaciones del año. Recordemos que los perfiles son obtenidos

utilizando el Lidar elástico que emite y recibe en 532 nm. Además, nuevamente la altura hasta la que se muestran estos perfiles es de 3000 m, ya que no hay ninguna perturbación en las señales sobre esa altura. Entonces, estos tres primeros kilómetros representan la parte más relevante de la tropósfera para nuestro estudio, ya que hasta esta altura podemos encontrar capas de aerosoles en días normales (días sin eventos especiales como incendios, quemadas de biomasa, erupciones volcánicas, etc), y además confirma la presencia permanente de una capa de aerosoles, es decir, la estabilidad de la capa de aerosoles locales sobre el sitio de medidas. Además, como se puede ver de la Fig. 4.4, para el día 11 de Septiembre el sistema reconoce las diferentes subcapas que componen la capa de aerosoles, confirmándose así la utilidad de las medidas realizadas por el sistema para el estudio de estas partículas.

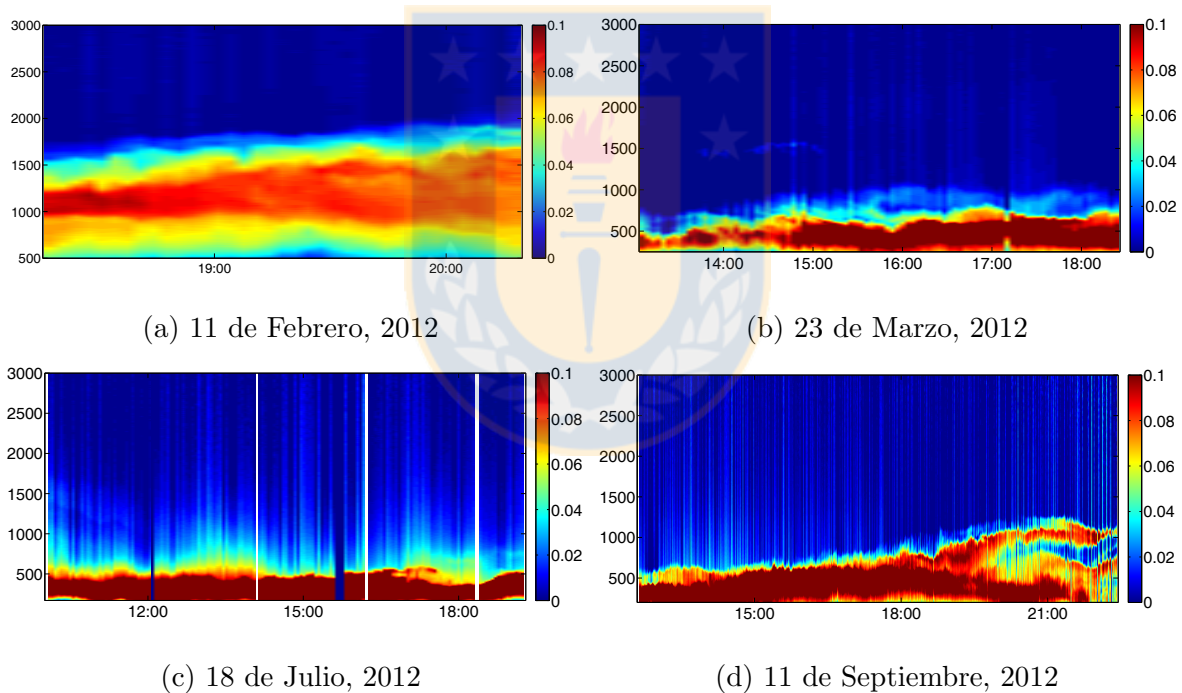


Figura 4.4: Series de tiempo del coeficiente de backscattering para un día representativo por cada estación del año, para el periodo entre Febrero a Septiembre de 2012.

Además del estudio del comportamiento estacional de los aerosoles sobre la ciudad de Concepción, se realizó un estudio más detallado de algunos días con comportamientos especiales, los cuales se presentan a continuación.

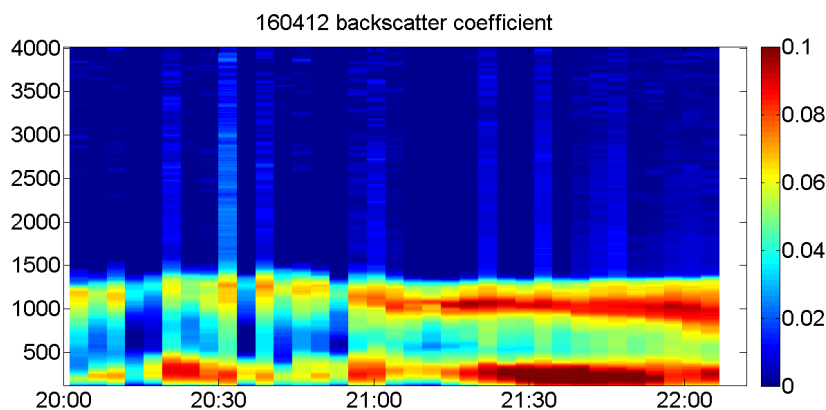


Figura 4.5: Serie de tiempo para el día 16 de Abril de 2012

4.2. Análisis de Eventos Medidos con el Sistema Lidar Elástico

Debido a la ubicación del sistema Lidar, a la baja carga de aerosoles presente en el lugar de medida, y a la procedencia de las masas de aire, es fácilmente identificable cuando los aerosoles poseen características ópticas distintas al promedio. La baja carga de aerosoles, puede ser demostrada porque a pesar de existir fuentes locales como industrias de acero, plástico y harina de pescado, la ciudad posee una muy buena ventilación, debido a las masas de aire provenientes desde el Océano Pacífico. Llamaremos *días evento* a los días distintos al promedio, es decir, casos con características ópticas distintas las cuales pueden ser producidas principalmente por incendios forestales cercanos al lugar de medida, especialmente en el verano y en otoño.

4.2.1. 16 de Abril de 2012

Mientras se realizaban las medidas para el 16 de Abril de 2012, se observó un comportamiento distinto al usual, por lo que se procedió a medirlo hasta que la humedad del ambiente lo permitiera. Al procesar los datos con el algoritmo de inversión y obtener la serie de tiempo correspondiente a ese día (Fig. 4.5), se observa que existe una separación dentro de la capa de aerosoles. Al buscar la causa de este comportamiento se encontró que al sur-oeste de Concepción, cercano a la ciudad, había ocurrido un incendio forestal, por lo que esta separación sería el transporte de aerosoles desde ese lugar hasta la ubicación del sistema Lidar. La medición de este *evento* tuvo una duración de dos horas.

En la Fig. 4.6 se observa el comportamiento del coeficiente de backscattering promedio para el 16 de Abril (curva azul) entre las 20:00 y 22:00 hrs local (23:00 a 01:00 UTC), y se compara con el perfil promedio durante el otoño del mismo año (curva ne-

gra). Las sombras que rodean las curvas son las barras de error correspondientes a cada curva, las cuales corresponden a la desviación estándar en las medidas. En la curva del coeficiente de backscattering para el 16 de Abril se observa un segundo máximo en la señal, que corresponde a la capa de aerosoles a una altura aproximada de 1100 m sobre el nivel del sistema Lidar, como se mostró en la Fig. 4.5, además, a pesar de no ser tan intensa en la Fig. 4.6. En la Fig. 4.5 también se observa otra capa de aerosoles más débil por debajo de 500 m. Esta capa inferior de aerosoles se puede relacionar con la capa de aerosoles estable que se mantiene durante los meses de otoño, como se presentó en la sección anterior (Fig. 4.2), por lo que la capa superior en 1100 m correspondería a una capa externa de aerosoles debido a las condiciones especiales de ese día (incendio forestal). Usando información complementaria de HYSPLIT [Draxler & Rolph, 2003], que entrega las retrotrayectorias de las masas de aire que llegaron a Concepción ese día y que son proporcionadas por NOAA-ARL, para el período entre el 10 y el 19 de Abril de 2012, se observa que las masas de aire provienen del Océano Pacífico, como es de esperar, pero algunas de ellas, antes de llegar a la ciudad también pasan por el continente (Fig. 4.7), trayendo consigo los aerosoles que puedan encontrarse ahí. De los datos de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [Giglio *et al.*, 2003, Davies *et al.*, 2004], que entrega datos satelitales de detección de incendios, para el mismo período (Fig. 4.8), se observa que por el lugar donde pasan las retrotrayectorias, al sur-oeste de Concepción, ocurrieron algunos incendios durante esos días, por lo que se comprueba que la capa de aerosoles a 1100 m que se observa en la Fig. 4.4, se debe a aerosoles producidos en incendios forestales que fueron transportados por las masas de aire provenientes del océano y que pasaron por el lugar de los incendios antes de llegar a la ubicación del sistema Lidar.

4.2.2. 10-12 de Abril de 2012

El día 10 de abril comenzó como un día típico con una capa de aerosoles estable. El día siguiente, 11 de Abril, a mediodía la señal Lidar medida comenzó a distorsionarse, presentando varios máximos, los que se consideraron como distintas estructuras en la capa de aerosoles. Esta situación se mantuvo hasta el día 12 de Abril como se muestra en la serie de tiempo correspondiente a estos tres días (Fig. 4.9). Para averiguar la fuente de esta estructura altamente compleja de aerosoles, se procedió a realizar un análisis similar al realizado para el día 16 de Abril.

Primero, se comparó la señal de backscattering promedio para cada día del evento con la señal promedio obtenida para los meses de otoño, como se muestra en la Fig. 4.10. De aquí se puede ver que el coeficiente de backscattering es mucho mayor que el promedio esperado para un día normal en otoño, tomando valores máximos el día 12 de Abril. Además, de las gráficas del coeficiente de backscattering se observa que para el día 10 de Abril el coeficiente de backscattering aumenta considerablemente, mientras que para los días 11 y 12 de Abril, además del aumento del valor del coeficiente de backscattering, se observa una capa de aerosoles alrededor de los 1000 m.

4.2. ANÁLISIS DE EVENTOS MEDIDOS CON EL SISTEMA LIDAR ELÁSTICO47

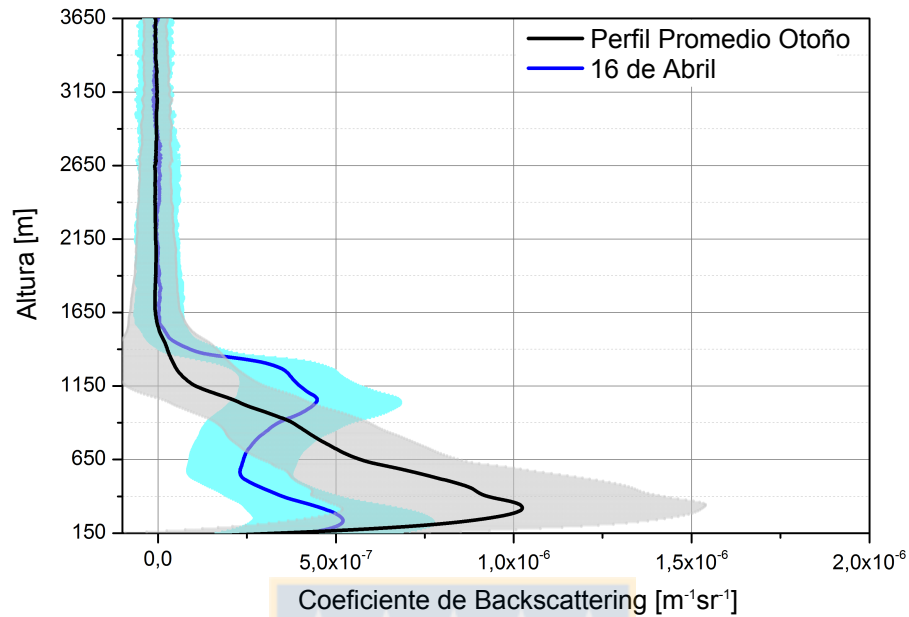


Figura 4.6: Perfiles promedio para el coeficiente de Backscattering para el día 16 de Abril de 2012 entre las 20:00 y 22:00 hrs local y para el otoño del mismo año

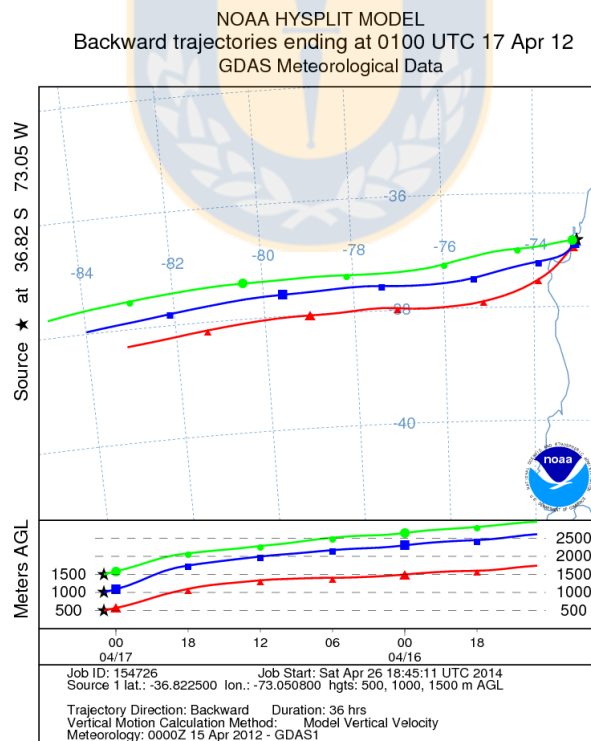


Figura 4.7: Retrotrayectorias obtenidas utilizando HYSPLIT para el día 16 de Abril de 2012 a las 01:00 hrs UTC.

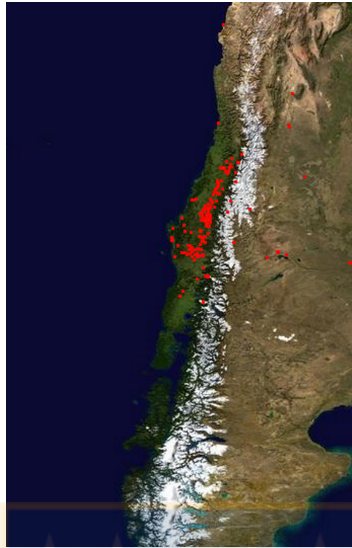


Figura 4.8: Mapa de MODIS de incendios comenzados entre el 10 y el 19 de Abril del 2012 cercanos a la ciudad de Concepción.

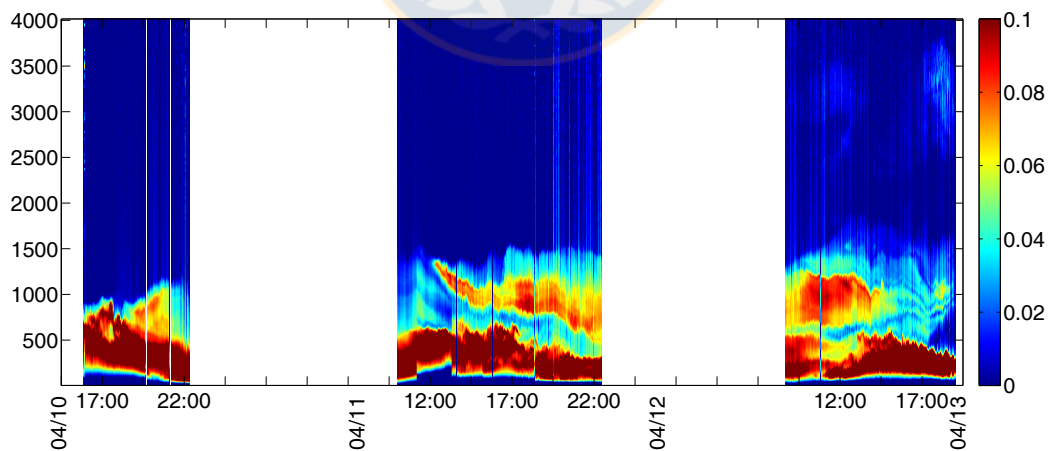


Figura 4.9: Serie de Tiempo para el Coeficiente de Backscattering para el período entre el 10 al 12 de Abril de 2012

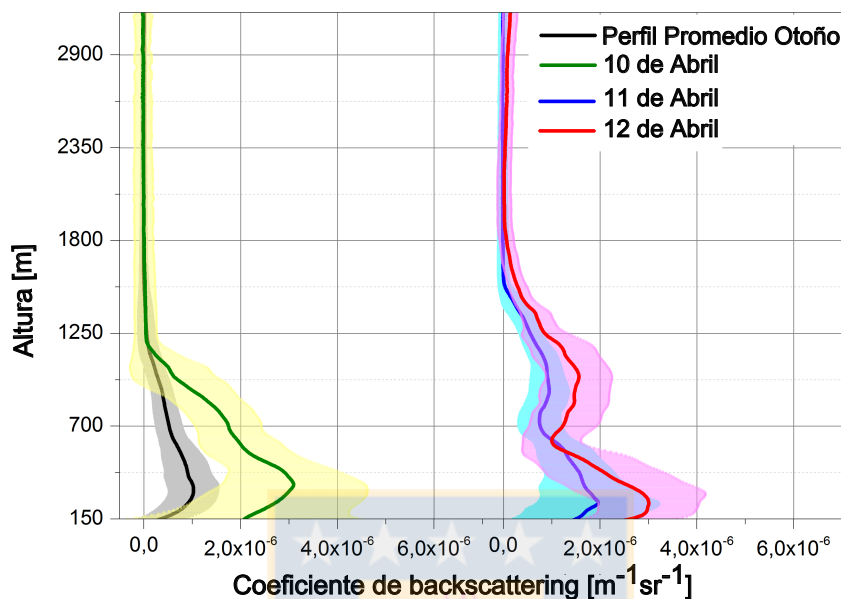


Figura 4.10: Perfiles de los coeficientes de backscattering promedio para cada día del evento (10, 11 y 12 de Abril de 2012) y perfil promedio del comportamiento del coeficiente de backscattering durante los meses de otoño.

Después de identificar la estructura de la capa de aerosoles, se utilizó el modelo HYSPLIT para obtener las retrotrayectorias de las masas de aire que llegaron a la ciudad de Concepción en este período. De aquí, son identificadas diferentes masas de aire. Como dos de las retrotrayectorias pasan por el continente antes de llegar al lugar de medida (retrayectorias correspondientes a los 500m y a los 1000m), se utiliza MODIS para identificar focos de incendios que hubiesen ocurrido por donde circulan las masas de aire (Fig. 4.12). De aquí, se observa que la que corresponde a masas de aire a 500 m, pasa por un sector donde hay focos de incendios, por lo que transporta aerosoles debido a ellos, y que al ser medidos con el sistema Lidar, corresponden a una capa de aerosoles a 500 m.

Para obtener información adicional acerca de los aerosoles transportados por las masas de aire, fueron utilizadas simulaciones de el U.S. Naval Aerosol Analysis and predictive System (NAAPS, por sus siglas en inglés), las cuales entregan concentración superficial de humo y concentración de sulfatos. De acuerdo con las simulaciones de NAAPS para concentración de humo (Fig. 4.13), éstas se mantuvieron más altas que $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$

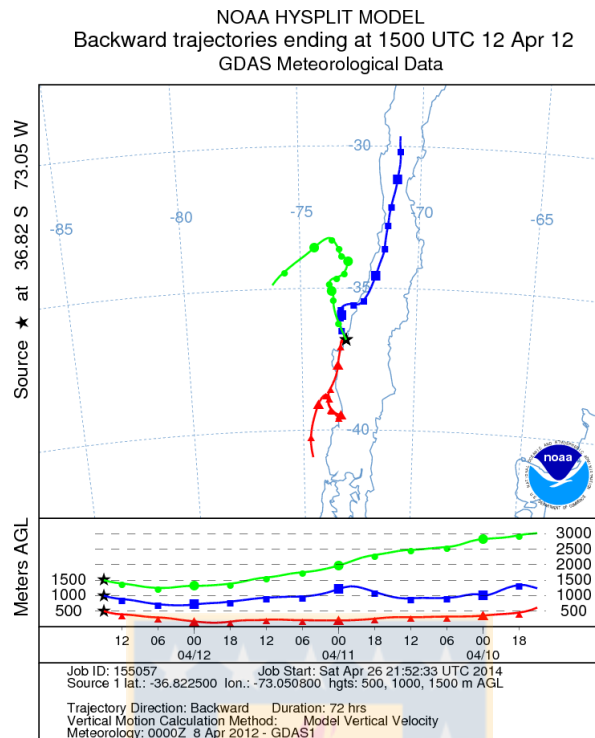


Figura 4.11: Retrotayectorias obtenidas utilizando HYSPLIT para las masas de aire que llegaron a Concepción durante el período entre el 10 y el 12 de Abril de 2012.

entre las 18 UTC del 10 de Abril y las 18 UTC del 12 de Abril, lo que corresponde a los incendios forestales al sur de Concepción, y que son transportados por las masas de aire a 500 m de altura. Además, de la simulación de NAAPS para concentración de sulfatos (Fig. 4.14), se observa que existe una alta concentración al norte de Concepción entre las 18 UTC del 10 de Abril y las 00 UTC del 12 de Abril, la cual coincide con la retrorayectoria azul que corresponde a las masas de aire a 1000 m, por lo que la capa de aerosoles a la misma altura medida con el sistema Lidar, corresponde al transporte de sulfatos por medio de las masas de aire. Así, se puede explicar que esta capa de aerosoles de estructura compleja que estuvo presente durante este período se debe tanto a los incendios forestales como a las altas concentraciones de sulfatos.

4.3. Conclusiones del Análisis de Datos Lidar Elásticos

De los resultados del análisis de los datos Lidar Elásticos del periodo entre Febrero y Septiembre de 2012, realizado previamente, se concluye que la ciudad de Concepción, al ser una ciudad costera con muy buena ventilación, posee una carga de aerosoles a muy baja altura que varía estacionalmente. La capa de aerosoles alcanza una altura máxima durante los meses de verano, para luego disminuir durante el otoño, llegando

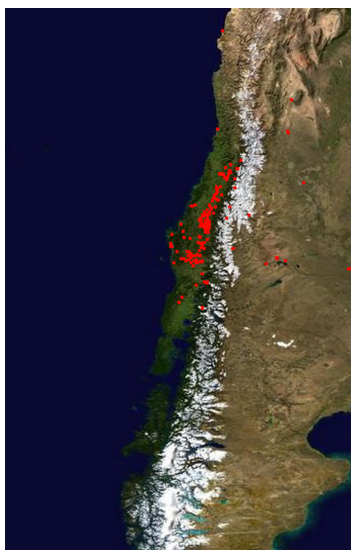


Figura 4.12: Mapa obtenido utilizando MODIS para identificar incendios durante el período entre el 10 y el 12 de Abril de 2012.

a su mínimo durante los meses de invierno, finalmente, vuelve a aumentar durante la primavera completando el ciclo. Además, esta capa constante que se logró medir con el sistema Lidar, permite identificar fácilmente cuando ocurre algún evento como los presentados en este capítulo. Para el análisis de los eventos ocurridos se deben utilizar datos adicionales, como retrotrayectorias de las masas de aire para identificar el origen de las masas de aire (HYSPLIT), ubicación de focos de incendios (MODIS) y presencia de concentración de humo y sulfatos en la zona (NAAPS). Esta información adicional permite conocer el tipo de aerosol que está provocando el evento y el origen de éste.

La información obtenida del análisis de estos datos, contribuye a aumentar el conocimiento de las propiedades ópticas de los aerosoles al sur del Pacífico Sur, ya que la estación Lidar-CEFOP es la única estación en esta zona (excluyendo a las que se encuentran en la Antártica). Los resultados del sistema Lidar permiten conocer tanto la distribución vertical de los aerosoles como su comportamiento en el tiempo (climatología), logrando obtener la evolución temporal de las propiedades ópticas de interés.

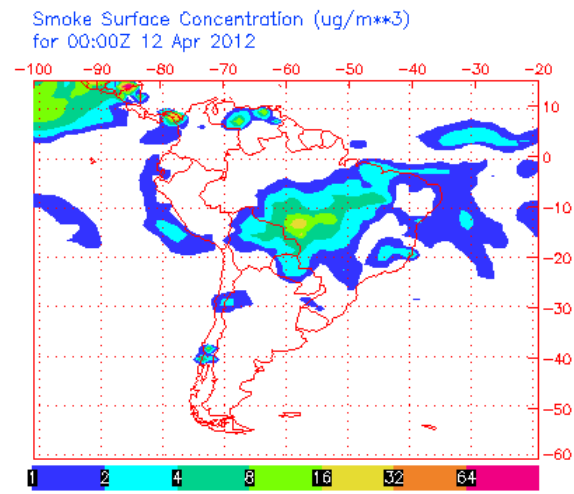


Figura 4.13: Mapa obtenido utilizando simulaciones NAAPS para concentración superficial de humo el 12 de Abril de 2012 a las 00 UTC.

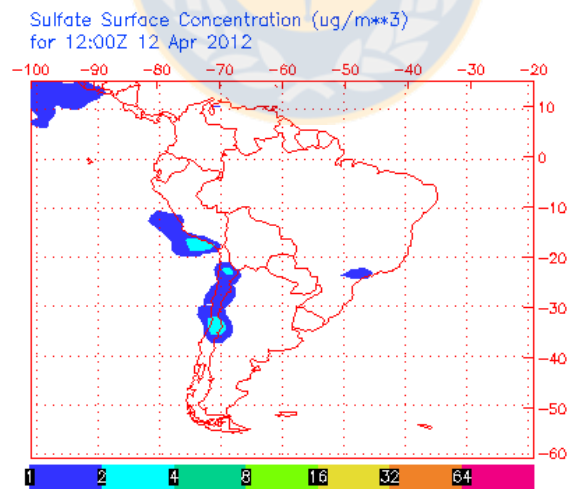


Figura 4.14: Mapa obtenido utilizando simulaciones NAAPS para concentración de sulfatos el 12 de Abril de 2012 a las 12 UTC.

5

Validación de los Algoritmos de Inversión para el análisis de señales Lidar

Los códigos de inversión para datos medidos con el sistema Lidar-CEFOP tanto elásticos como inelásticos son el objetivo principal de este trabajo. Estos algoritmos fueron desarrollados íntegramente por el grupo Lidar-CEFOP, y su fiabilidad fue comprobada a través de un proceso de validación mediante intercomparación de los distintos resultados obtenidos para este trabajo con resultados de algoritmos validados procesando los mismos datos, bajo condiciones similares. Para el caso del Algoritmo de Inversión de datos Elástico, utilizando el método de Klett-Fernald, la validación comenzó durante la primera campaña en conjunto realizada por LALINET [Barbosa *et al.*, 2014], donde se realizaron medidas Lidar simultáneas desde el 10 al 14 de Septiembre de 2012 y los datos obtenidos de esta campaña fueron procesados por cada una de las estaciones Lidar para luego ser comparados, esta comparación se realizó en cuatro etapas donde se cumplieron los requisitos presentados a continuación. A partir de este trabajo en conjunto, surgió el proceso de validación de todos los algoritmos de LALINET para futuras campañas, originando el I Workshop on Lidar Inversion Algorithms-ALINE, donde el objetivo fue validar todos los algoritmos elásticos de la red Latinoamericana de Lidar, para que así, al realizar campañas en conjunto, todas las estaciones pertenecientes a la red obtuviesen resultados en formatos comparables. La validación del Algoritmo de Inversión de datos Raman, se realizó en el Leibniz Institute for Tropospheric Research (TROPOS), ubicado en Leipzig, Alemania.

5.1. Validación del Algoritmo para Análisis de Datos Elásticos

La primera parte de la validación del algoritmo para datos elásticos se realizó en el contexto de la primera campaña de medidas Lidar simultáneas de LALINET [Barbosa *et al.*, 2014]. Esta campaña se realizó entre el 10 y el 14 de Septiembre de 2014, y contó con la participación de cuatro estaciones Lidar sudamericanas: Manaus, Sao Paulo, Concepción y Buenos Aires.

Para comenzar, cada estación debió escoger una hora de medidas continuas sin nubes para ser analizadas por todos los grupos pertenecientes a la Red. Cada grupo procesó estos datos con sus algoritmos de inversión respectivos. Los resultados de este procesamiento fueron comparados y discutidos, y fueron propuestos cuatro etapas de ajuste de los algoritmos para disminuir las diferencias entre los resultados obtenidos.

Luego de este primer trabajo en conjunto por parte de LALINET, se demostró la necesidad de nuevamente comparar y validar los algoritmos de inversión de todas las estaciones para futuras campañas, por lo que se realizó el Primer Workshop de Algoritmos de Inversión Lidar de la Red Latinoamericana de Lidar (LALINET) organizado por el Centro de Óptica y Fotónica (CEFOP) de la Universidad de Concepción y donde participaron los creadores de los algoritmos de inversión de los grupos Lidar de Colombia, Brasil (Sao Paulo y Manaus), Argentina y Chile. El objetivo de esta reunión de trabajo fue comparar, mejorar y unificar todos los algoritmos utilizados por las estaciones pertenecientes a LALINET para inversión de datos Lidar elásticos. La evaluación y posterior mejora de los algoritmos se basó en el análisis de dos conjuntos de datos y la comparación con sus respectivos resultados esperados.

5.1.1. Primera campaña de medidas simultáneas de las estaciones pertenecientes a LALINET

El primer trabajo en conjunto de la Red Latinoamericana de Lidar fue la campaña realizada entre el 10 y el 14 de Septiembre de 2012. Este período se escogió debido a que es la temporada de quema de biomasa en el Amazonas. Cada estación realizó medidas entre las 8am y las 8pm hora local, mientras existieran las condiciones de cielo despejado. Los datos se registraron cada 1 minuto y todos los datos obtenidos fueron compartidos a toda la red. Para obtener los datos meteorológicos de todas las estaciones, el grupo perteneciente al Departamento Meteorológico de la Universidad Federal de Pelotas, Brasil estuvo a cargo de generar un boletín diario con los pronósticos. Este boletín además incluía un análisis sinóptico integrado con el espesor óptico obtenido por MODIS para el día previo y un pronóstico del transporte de la quema de biomasa en 24 hrs utilizando el modelo CATT-BRAMS de INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Paulo). Debido a dificultades particulares de algunas estaciones, sólo 4

5.1. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE DATOS ELÁSTICOS 55

Nombre y Ubicación	Longitud de onda detectada [nm]	Resolución	Días de Medida
Manaos (Ma) 2.891°S, 59.97°O 100 msnm	355,387,408	7.5 m; 60 seg	10,11,12,13,14
Sao Paulo (Sp) 23.46°S, 46.23°O 740 msnm	355,387,408 532,607,660	7.5 m; 200 seg	10,12,14
Buenos Aires (Ba) 34.54°S, 58.51°O 20 msnm	355,387,408 532,607,1064	7.5 m; 10 seg	11,12,13,14
Concepción (Cp) 36.84°S, 73.02°O 170 msnm	532	7.5 m; 60 seg	11,12,13

Tabla 5.1: Descripción de las estaciones Lidar que midieron durante la campaña y los días de Septiembre que cada una midió

podieron entregar resultados para este período. Toda la información de la campaña, las dificultades y el análisis de los resultados obtenidos se resumieron en un trabajo presentado por primera vez en el VII Workshop on Lidar Measurements in Latin-America, durante Noviembre de 2012, y posteriormente una publicación en la revista *Optica Pura y Aplicada* [Barbosa *et al.*, 2014], la cual es la primera publicación en conjunto de la red. Además, a partir de esta campaña, se vio la necesidad de además de comparar los algoritmos, comparar los sistemas de cada estación, en función de la operación y rendimiento del sistema para tener información completa de todos los instrumentos de la red, trabajo que ya ha sido enviado a publicación [Guerrero-Rascado *et al* (2014)].

Dentro de esta campaña, se realizó el primer ejercicio de procesamiento conjunto de datos Lidar, para este caso, sólo de datos elásticos. Como la mayor parte de las estaciones posee el canal de 532 nm, éste fue el canal de los datos procesados, excepto para el caso de Manaos, donde se trabajó con el canal de 355 nm. Así, cada estación escogió un perfil de una hora continua de medidas para ser analizados, los cuales fueron enviados junto con los datos moleculares respectivos. Cada grupo procesó el coeficiente de backscattering de aerosoles, utilizando el promedio de la hora de medidas que cada estación envió (corregidos el desplazamiento entre los canales análogos y de fotoconteo y corregidas en tiempo muerto), para dar inicio a la comparación de los resultados. Luego de este primer resultado, se revisaron las curvas obtenidas y se discutieron las diferencias entre ellas. A partir de esta discusión se diseñaron cuatro etapas. En cada una de ellas se aplicaba un criterio nuevo y se obtenían nuevos coeficientes de backscattering para aerosoles. En la primera etapa, sólo contribuyeron los grupos de Sao Paulo, Concepción y Manaos a los perfiles. Y para la etapa siguiente, también participó el grupo de

Medellín. Para el análisis de las curvas, los grupos fueron anónimamente identificados como 1,2,3 y 4.

Es así como el proceso de comparación y mejora de los algoritmos se resume en las siguientes cuatro etapas.

- **Etapa 1:** Para la primera etapa cada grupo utilizó su algoritmo sin ninguna especificación para el método o ninguna hipótesis previa, es decir, sin referencia para la región molecular, sin ajuste Rayleigh, sin correcciones de overlap o referencia para la altura de referencia del coeficiente de backscattering de aerosoles. Los únicos parámetros fijos fueron el Lidar Ratio, escogido para Manaos en 55 sr^{-1} , para Concepción en 30 sr^{-1} y 70 sr^{-1} para las otras locaciones. Estos son valores típicos para los tipos de aerosoles esperados en cada estación Lidar.
- **Etapa 2:** En esta etapa se especificó que cada grupo debía utilizar un algoritmo de inversión basado en el método de Klett (backward) [Klett, 1981], integrando desde arriba de la capa de aerosoles hasta el suelo.
- **Etapa 3:** Aquí, además de las restricciones anteriores, se exigió que los algoritmos de inversión debían utilizar también el método de Klett-Fernald [Fernald, F., 1984], es decir, obtener primero el coeficiente de backscattering de aerosoles, y a partir de este valor y utilizando el lidar ratio, obtener el coeficiente de extinción de aerosoles.
- **Etapa 4:** La altitud de referencia se fijó a 1 km por sobre la capa de aerosoles y se asumió que a partir de esta altura el coeficiente de backscattering de aerosoles era nulo.
- **Etapa 5:** Dado que no fue posible estimar el retraso de los datos análogos para la estación de Buenos Aires, puesto que el canal de fotoconteo no estaba disponible en esta estación, en esta etapa se fijó el valor de este retraso en 7 bins para ser utilizado en esta etapa.

Resultados

Los resultados del coeficiente de backscattering para cada grupo son presentados en la Fig. 5.1, donde cada columna representa una etapa de la comparación y cada fila un conjunto de medidas distinto.

Para el caso de los datos de la estación de Sao Paulo, los resultados presentan claras diferencias en la primera etapa. La primera diferencia fue debido a que en los grupos 1 y 2 los datos estaban desfasados debido a un error en la consideración de la altura a la que se encontraba la estación Lidar, lo cual se corrigió para la segunda etapa. Además, ambos grupos (1 y 2) basaban sus algoritmos en el método de Klett hacia atrás, es

5.1. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE DATOS ELÁSTICOS57

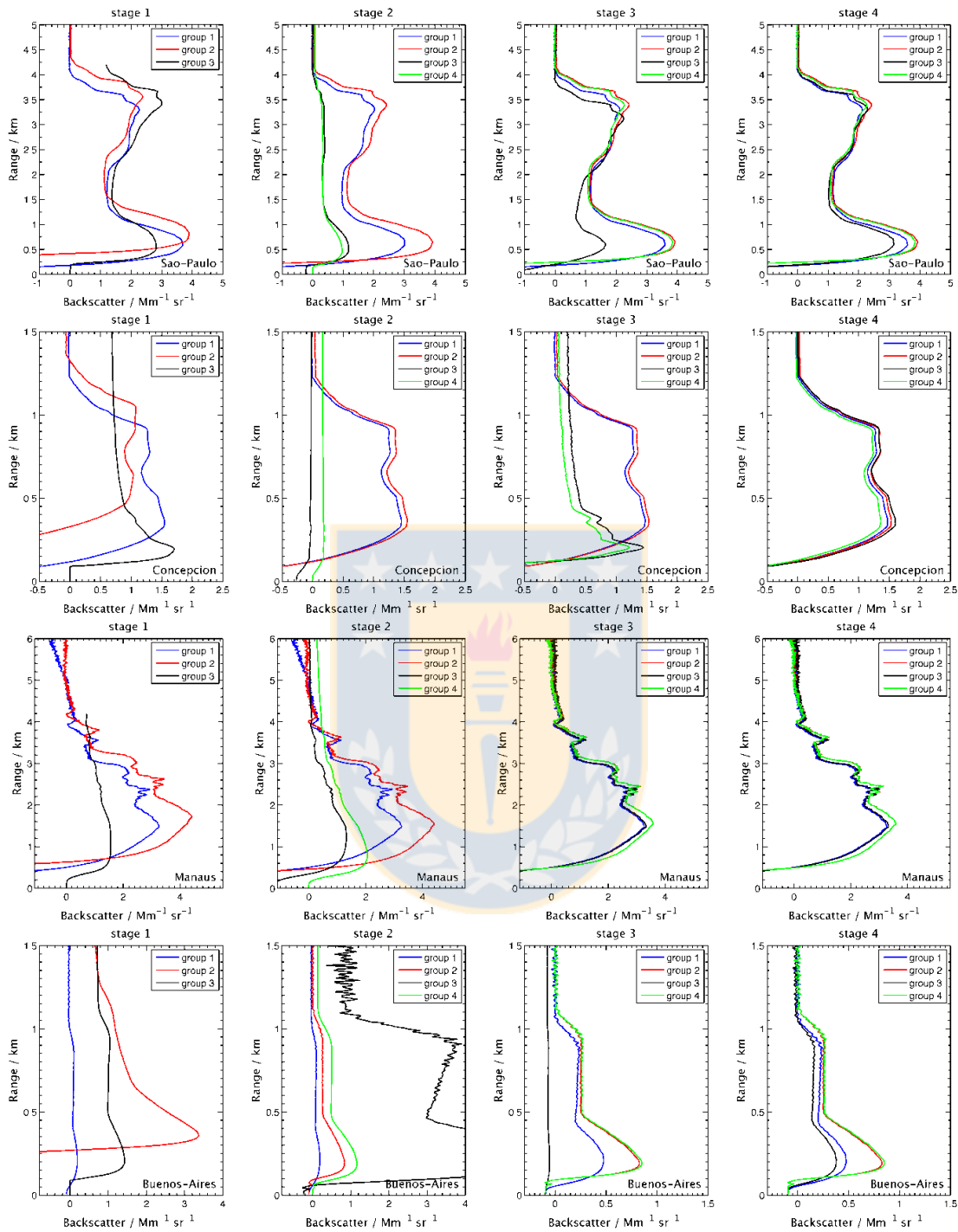


Figura 5.1: Gráficas del Coeficiente de Backscattering de aerosoles [$Mm^{-1} sr^{-1}$] obtenidos con el algoritmo de cada estación Lidar perteneciente a LALINET. Las filas (desde arriba hacia abajo) muestran los resultados obtenidos para los datos de cada estación en el siguiente orden: Sao Paulo, Concepción, Manaus y Buenos Aires. Las columnas representan la etapa con la que se estaba trabajando (*stage*). En general se llegó a una buena aproximación después de 4 etapas, excepto en el caso de Buenos Aires para la que se necesitó una etapa más. [Barbosa *et al.*, 2014].

decir, la integral utilizada en el método comenzaba en el valor de altura máximo e iba disminuyendo, por lo que los perfiles de backscattering comenzaban con valores de $0 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ sobre la capa de aerosoles y se volvía negativo para altitudes menores. Esto se debía a que no realizaban correcciones en el *overlap*. El grupo 3 utilizaba el mismo método de Klett, pero hacia adelante, es decir, la integral del método comenzaba en la superficie e iba subiendo hasta alcanzar la altura máxima utilizada en el método, lo cual hacía que los valores de backscattering obtenidos comenzaran en $0 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ a nivel de superficie y aumentando los valores a medida que se aumentaba la altura. Para la segunda etapa, los grupos 3 y 4 cambiaron sus algoritmos para utilizar el método de Klett hacia delante, lo cual resultó en que estos dos grupos obtuvieran gráficas similares entre sí, pero no similares a las obtenidas con el método de Klett-Fernald. Es por esto, que para la etapa 3, los grupos 3 y 4 cambiaron nuevamente sus algoritmos para utilizar el método de Klett-Fernald hacia adelante. Así, el grupo 4 obtuvo resultados similares a los grupos 1 y 2, y debido a una mal elección de la altura de referencia, el grupo 3 obtuvo resultados distintos, los cuales fueron corregidos en la etapa 4. Luego de estas cuatro etapas, los algoritmos de todos los grupos que participaron llegaron a resultados similares (Sao Paulo, Manaus, Concepción, Medellín).

Después de cada etapa, los algoritmos corregidos de cada grupo procesaban los datos de todas las estaciones. En el caso de los datos de la estación de Concepción, también se ve un resultado bastante similar entre todas las estaciones, nuevamente debido al cambio en los métodos utilizados. Las diferencias que presentan las curvas son cercanas a $0.2 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ para un valor máximo del backscattering de $1.5 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$, lo cual es el 50% menos que las diferencias para los datos de la estación de Sao Paulo, donde las diferencias entre las curvas eran cercanas a $1 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ para un máximo en el coeficiente de backscattering de $3.5 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Esto no se esperaba debido a que todos los grupos utilizan el mismo método para calcular el parámetro óptico. Revisando la última columna de las gráficas de la Fig. 5.1, se identifican dos grupos de resultados para el caso de los datos de Sao Paulo, Manaus y Buenos Aires. La diferencia entre los grupos 1 y 3 y entre los grupos 2 y 4 es aproximadamente $0.5 \text{ Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ en el máximo del coeficiente de backscattering. Sin embargo, esta diferencia no es constante, ya que para menores valores del coeficiente de backscatterign aumenta, como se ve en los casos de Buenos Aires y Manaus.

Al revisar los algoritmos nuevamente, se encontró que todas las estaciones corregían de forma distinta el desplazamiento entre los canales análogos y de fotoconteo. Lo cual no ocurrió para el caso de los datos de la estación de Concepción debido a que esta información fue proporcionada y todos los grupos utilizaron el mismo criterio. Entonces este desplazamiento distinto producía diferencias considerables entre los resultados, por lo que se procedió a revisar cuánto cambiaban las curvas al cambiar el *delay* entre los datos. Hasta la cuarta etapa todos los grupos consideraron un *delay* de 9 bins para el caso de Concepción; el grupo 1 consideró un delay de 10 bin para Manaus, Sao Paulo y Buenos Aires, lo que corresponde a 75 m; el grupo 2 también consideró un

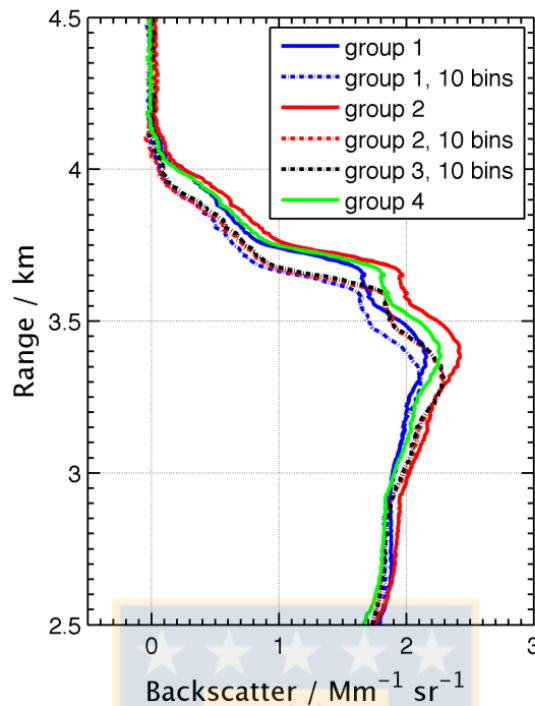


Figura 5.2: Comparación de los perfiles del coeficiente de backscattering obtenidos con los diferentes algoritmos de los grupos pertenecientes a Lalinet, para los datos de la estación de Sao Paulo con desplazamientos entre los canales análogo y de fotoconteo de 0 y 10 bins. [Barbosa *et al.*, 2014].

delay de 10 bins para Manaus y Sao Paulo, pero uno de 7 bins para Buenos Aires; y los grupos 2 y 4 no realizaron ninguna corrección a los otros conjuntos de datos. Entonces, para comprobar el efecto de este desplazamiento en los resultados se volvió a analizar el caso de Sao Paulo, pero en este caso, se procesaron los datos con un *delay* de 0 y de 10 bins. Los resultados de esto se observan en la fig. 5.2, donde se ve que la diferencia en el desplazamiento vertical es comparable con las obtenidas en la etapa 4.

A pesar de que en la etapa 1 se tenían diferencias de un factor 5 entre los perfiles de backscattering, éstas fueron reducidas al modificar y mejorar cada uno de los algoritmos pertenecientes a los grupos participantes. El hecho de que existiesen errores sistemáticos en los diferentes algoritmos resaltó la necesidad de protocolos para el análisis de las medidas. Como ejemplo de esto, se demostró la importancia del desplazamiento entre los canales análogo y de fotoconteo y de cómo influyen en la inversión de la señal lidar, ya que diferencias tan grandes como $0.5 \text{ Mm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ pueden llegar a suceder al considerar desplazamientos de 0 bin a 10 bin.

Así, se llegó a una primera aproximación conjunta de los resultados de los algoritmos de inversión elástica pertenecientes a cuatro estaciones de LALINET (Concepción,

Medellín, Manaus y Sao Paulo). Pero para mejorar aún más los resultados obtenidos por todos los grupos fue necesaria una reunión de trabajo donde comparar cada uno de los algoritmos en distintas etapas para validar correctamente los algoritmos y corregir los errores sistemáticos que pudiesen tener.

5.1.2. Intercomparación de Algoritmos Lidar en el marco del I Workshop de Algoritmos Lidar-Lalinet

La evaluación y mejora de los algoritmos utilizados por las estaciones pertenecientes a Lalinet, se basó en el análisis de dos conjuntos de datos Lidar simulados y su comparación con los resultados esperados. El primer conjunto de datos fue el utilizado por la Red Europea de Lidar (EARLINET) [Boeckmann *et al.*, 2004] para validar sus algoritmos. El segundo conjunto de datos fue una modificación del primero hecho por el Dr. Henrique Barbosa, de la Universidad de Sao Paulo, que incluye diferentes niveles de ruido de Poisson. Estos dos primeros conjuntos de datos contenían datos de los canales elásticos: 355, 532 y 1064nm.

Para comenzar con la comparación, lo primero que se hizo fue homogeneizar la salida de todos los algoritmos para permitir una comparación más fácil. Esta salida se definió como un archivo de texto ascii sin cabecera y con las siguientes columnas a comparar: altura, coeficiente de backscattering, coeficiente de extinción, lidar ratio, coeficiente de backscattering molecular, coeficiente de extinción molecular, y señal sintética molecular. Los pasos 1,2 y 3 fueron realizados con el primer conjunto de datos; para el paso 4 con el segundo conjunto de datos.

A continuación se presentan los pasos realizados para la validación de los algoritmos.

- **Paso 1:** Para la primera evaluación de los algoritmos, se procesaron las señales sin conocer la respuesta, sólo comparando los resultados entre todos los grupos. Además, se definió una región molecular entre 12 y 15 km y se fijó el valor del LR para cada longitud de onda: 28 sr, 39 sr y 77 sr para 355nm, 532 nm y 1064 nm respectivamente. En esta primera evaluación, se comparó el resultado obtenido para el coeficiente de backscattering para las diferentes longitudes de onda. Los resultados de la primera comparación se muestran en la Fig. 5.3. En esta etapa el algoritmo Lidar-CEFOP, entregó resultados similares a los otros grupos con los que se estaba comparando, los resultados del algoritmo de Sao Paulo difería del resto debido a un problema en la altura del Lidar, y los resultados de Colombia fallaron en 532 nm debido a un mal Lidar Ratio.
- **Paso 2:** Después de corregir los problemas mencionados en el paso 2, se volvieron a procesar los datos obteniéndose las gráficas presentadas en la Fig. 5.4. Pese a que las curvas siguen el mismo comportamiento, poseen diferencias sistemáticas

5.1. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE DATOS ELÁSTICOS61

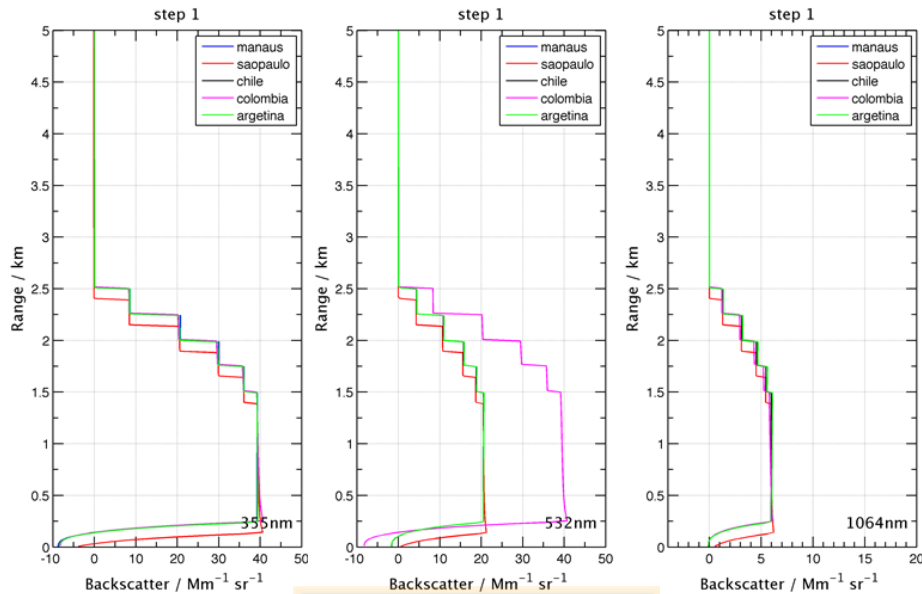


Figura 5.3: Gráficas del coeficiente de backscattering elástico de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] luego del Paso 1 para las distintas longitudes de onda (355 nm, 532 nm y 1064 nm)

entre ellas, por lo que se procede a comparar las cantidades moleculares obtenidas por cada grupo.

- **Paso 3:** Se procedió a revisar en detalle las diferencias existentes entre los resultados de los diferentes algoritmos y se descubrió que existía una diferencia en los valores de las cantidades moleculares. Los valores de las secciones transversales para el scattering Rayleigh variaban en alrededor un 7% entre los diferentes algoritmos debido al método que cada uno utilizaba (Bucholtz [Bucholtz, 1995] y Bodhaine [Bodhaine et al., 1999] o Nicolet [Nicolet M, 1984]), y por ello el valor final del Lidar Ratio variaba entre 8.3776 y 8.50411 sr, lo cual llevaba a las diferencias nombradas al principio. Por este motivo, se decidió adoptar el método Bucholtz-Bodhaine para toda la red, ya que era la mejor aproximación a los resultados esperados. Fue en este momento en que el algoritmo escrito para el grupo Lidar-CEFOP, que en un principio utilizaba las ecuaciones simplificadas de Nicolet, cambió a utilizar el método Bucholtz-Bodhaine debido a que al depender de más variables reales, entrega también valores más cercanos a la realidad. Después de este cambio, se volvió a comparar el valor del coeficiente de backscattering de partículas, y los resultados fueron coincidentes con los esperados, como se muestra en la Fig. 5.5. A continuación, se trabajó con el ajuste que se realiza entre la señal molecular y la señal medida (Rayleigh fitting), comparando el escalamiento entre las señales y la medida del ruido obtenido del ajuste. Es en este procedimiento donde se encontraron más problemas en los diferentes algoritmos. En el caso de nuestro algoritmo, se corrigió un problema en la corrección del background, el cual

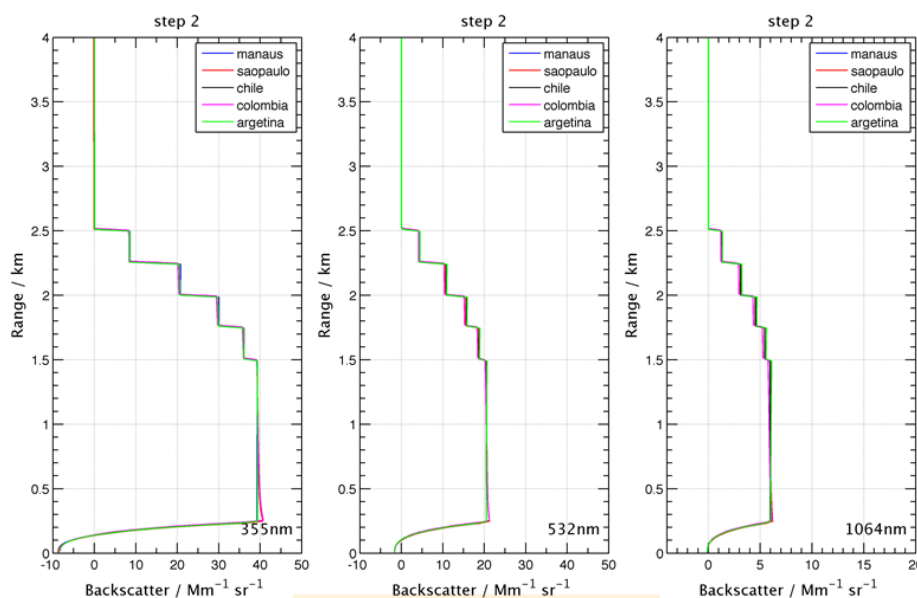


Figura 5.4: Gráficas del coeficiente de backscattering elástico de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] luego del Paso 2 para las distintas longitudes de onda (355 nm, 532 nm y 1064 nm)

se quitaba de la señal, pero no de la señal rango-correctada, y además, en lugar de calcular el ruido de los datos utilizando un tramo final de éstos y promediando, se cambió el método para utilizar el ruido que se obtiene del ajuste de la señal sintética molecular con la señal Lidar a través de un ajuste lineal en un rango en que sólo se considere la presencia de moléculas. Para el caso de Sao Paulo y Colombia, se estaba utilizando $\beta_{mol}(z)$ en lugar de $P_{mol}(z)$ para el ajuste de las señales moleculares y Lidar. Y en el caso de Argentina, las diferencias se producían porque en lugar de modificar la señal sintética, modificaba los datos reales, lo que llevaba a errores en el ajuste. Luego de los cambios, las diferencias entre los algoritmos para el ruido fueron menores a 0.3 %.

Después de las respectivas correcciones en cada algoritmo, se volvió a procesar la señal de backscattering molecular, y las señales de todos los grupos coincidían con el perfil simulado, excepto en la región afectada por el overlap. Para una mejor comprensión en las diferencias entre los perfiles obtenidos y el resultado esperado, en la Fig. 5.6, además del coeficiente de backscattering para cada longitud de onda, se presentan las gráficas de las diferencias existentes entre los valores obtenidos y los esperados. Las diferencias para 355 nm, 532 nm y 1064 nm son menores que $0.05 Mm^{-1}sr^{-1}$, $0.01 Mm^{-1}sr^{-1}$ y $0.06 Mm^{-1}sr^{-1}$ respectivamente, lo cual es aproximadamente un 0.1 %, 0.05 % y un 1 % de la señal de backscattering respectiva.

5.1. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE DATOS ELÁSTICOS63

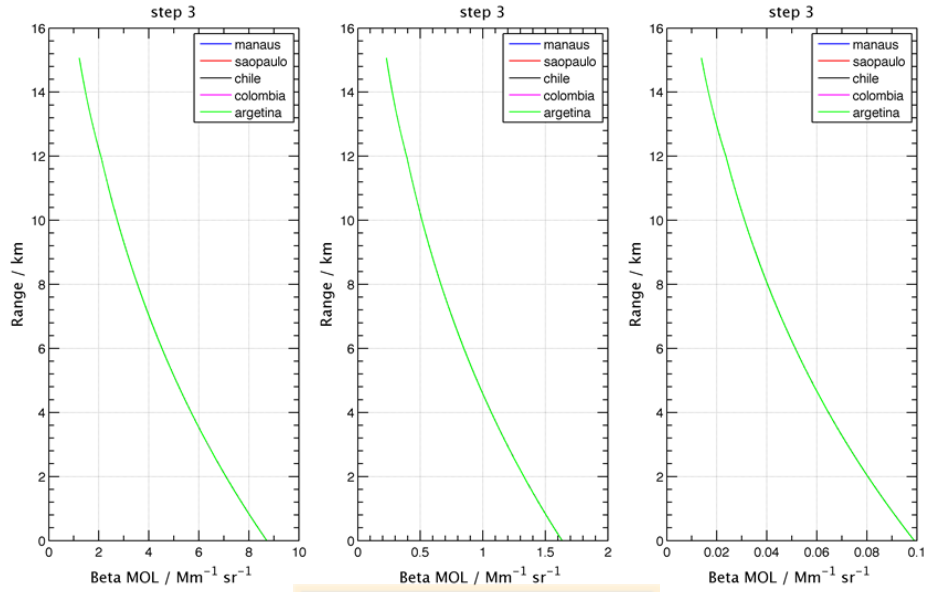


Figura 5.5: Gráficas del coeficiente de backscattering molecular [$Mm^{-1}sr^{-1}$] al comienzo del paso 3 para las distintas longitudes de onda (355 nm, 532 nm y 1064 nm)

- Paso 4:** En este paso, se trabajó con un conjunto de datos al que se le agregó ruido adicional. Las fluctuaciones agregadas fueron modeladas mediante una distribución Poissoniana para la suma de la señal Lidar y el *background* la señal más el ruido, es decir, $P(z) \rightarrow Poisson(10^3(P(z) + bg))$, donde bg varía desde 10^0 a 10^6 , lo que entrega una buena simulación de una señal de ruido. Los resultados obtenidos del procesamiento de este conjunto de datos se muestran en la Fig. 5.7. Para las Fig. 5.7 y 5.8, las curvas azul, roja, negra, fucsia, verde y celeste son las correspondientes a Manaos, Sao Paulo, Chile, Colombia, Argentina y referencia respectivamente. De aquí vemos que todos los algoritmos se comportan de la manera esperada hasta el nivel de ruido de 10^3 , y hasta el nivel 10^7 sólo presentan señales ruidosas, pero un buen comportamiento, excepto para los algoritmos de Sao Paulo y Colombia que no lograron procesar los datos para 1064 nm. Para el nivel 10^8 sólo los algoritmos de Argentina (355 y 532 nm) y Chile (532 y 1064 nm), lograron invertir los datos. En la Fig. 5.8 se muestran las diferencias entre las señales obtenidas y las esperadas, donde las diferencias para un nivel de ruido de 104 para 355 nm, 532 nm y 1064 nm son menores que $0.05 [Mm^{-1}sr^{-1}]$, $0.01 [Mm^{-1}sr^{-1}]$ y $0.06 [Mm^{-1}sr^{-1}]$ respectivamente.

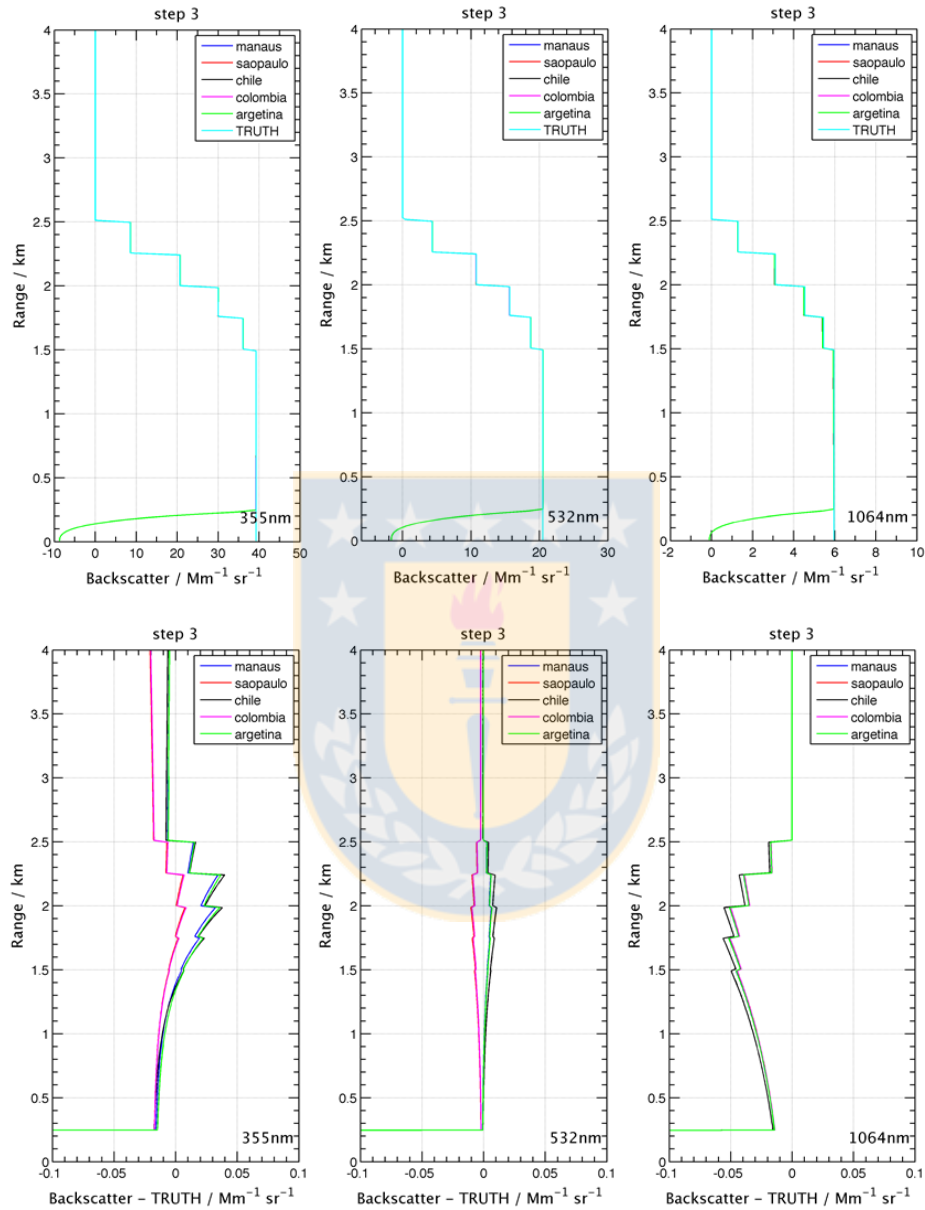


Figura 5.6: Gráficas del coeficiente de backscattering de aerosoles [$Mm^{-1}sr^{-1}$] después del paso 3 y la comparación con el resultado de la simulación (celestes) se muestran en las gráficas de arriba. Las gráficas inferiores muestran las diferencias de la solución de cada grupo y la señal simulada que debería resultar (truth).

5.1. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE DATOS ELÁSTICOS65

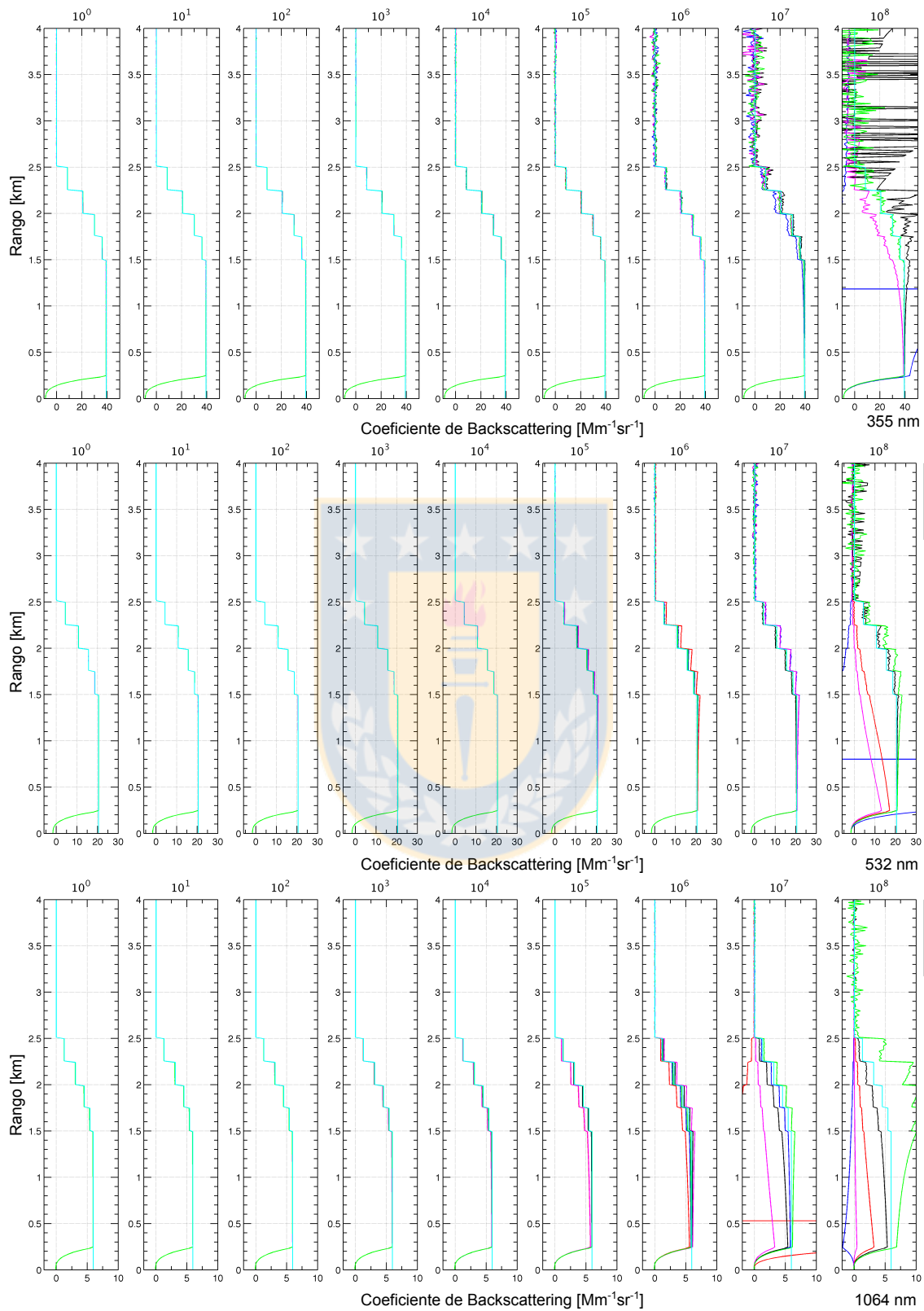


Figura 5.7: Gráficas del coeficiente de backscatering [$Mm^{-1}sr^{-1}$] para casos con distintos niveles de ruido para las distintas longitudes de onda: 355 nm (arriba), 532 nm (al medio) y 1064 nm (abajo).

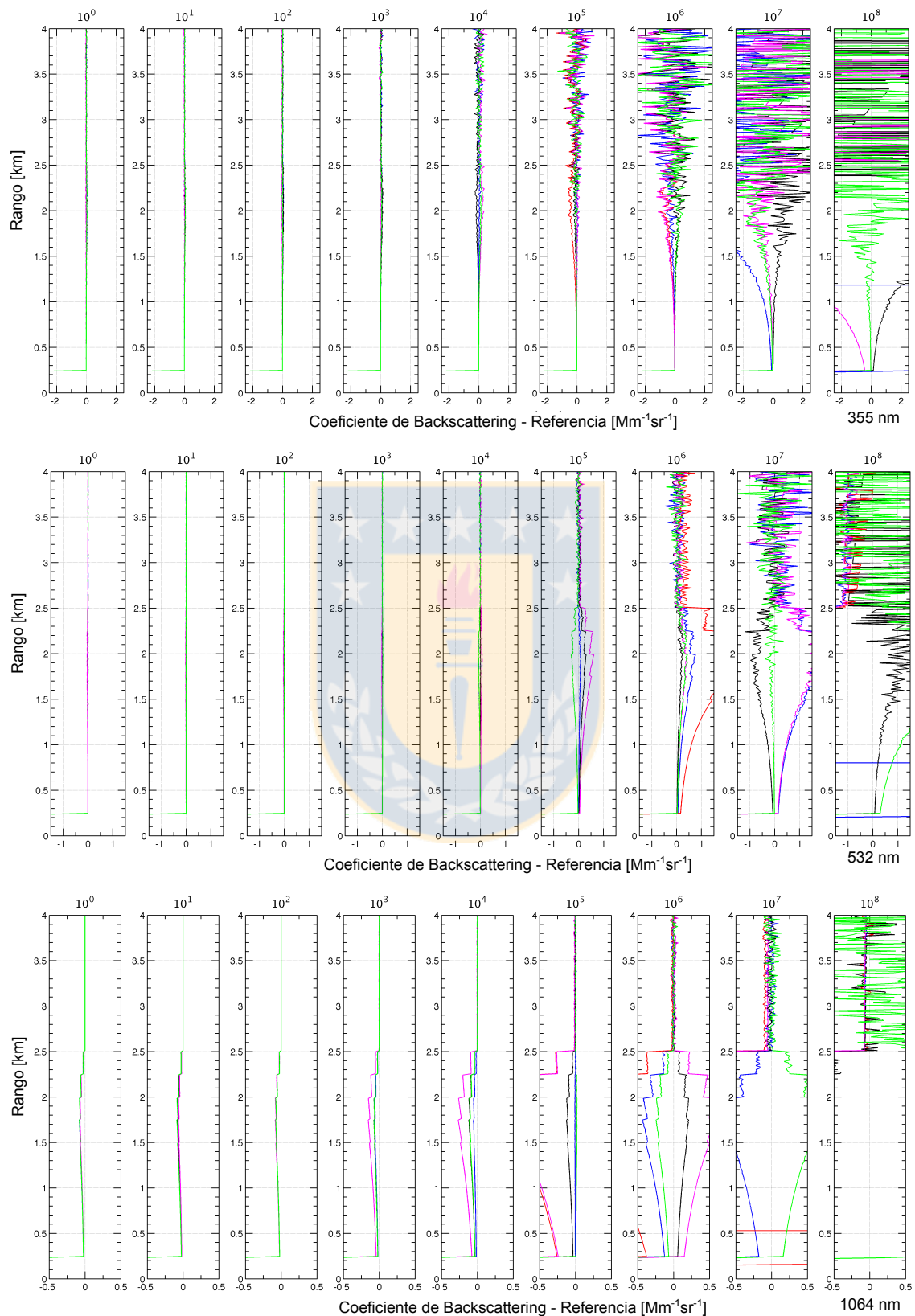


Figura 5.8: Gráficas de las diferencias del coeficiente de backscattering obtenidos [$Mm^{-1}sr^{-1}$] y la señal real esperada del coeficiente de backscattering [$Mm^{-1}sr^{-1}$] para diferentes niveles de ruido para las distintas longitudes de onda: 355 nm (arriba), 532 nm (al medio) y 1064 nm (abajo).

5.1.3. Conclusiones

De la intercomparación de los algoritmos de inversión de los grupos pertenecientes a la Red Latinoamericana de Lidar, se logró disminuir considerablemente las diferencias en los resultados obtenidos entre ellos, logrando que las diferencias para 355 nm, 532 nm y 1064 nm fueran menores que $0.05 Mm^{-1}sr^{-1}$, $0.01 Mm^{-1}sr^{-1}$ y $0.06 Mm^{-1}sr^{-1}$ respectivamente, es decir aproximadamente un 0.1%, 0.05% y un 1% de la señal de backscattering respectiva. En el caso del algoritmo de inversión perteneciente al sistema Lidar-CEFOP, se realizaron cambios en el método utilizado para la obtención de los valores moleculares y el cálculo del ruido de fondo a partir de la señal sintética molecular. La principal ventaja de la reunión de trabajo para la comparación de los algoritmos, fue la discusión y rápida solución a las diferencias que se observaban a lo largo de las distintas etapas. De esta reunión además se logró un consenso en la estructura y métodos que deben utilizar los algoritmos de la red, permitiendo también unificar y compartir de mejor manera los resultados obtenidos por ejemplo, para una futura campaña.

AL final de esta exhaustiva comparación, y en adición a la primera comparación realizada durante la campaña piloto de 2012, el algoritmo de inversión de datos elásticos se considera validado.

5.2. Validación del Algoritmo para análisis de datos Raman

Para la validación de los algoritmos de inversión para medidas Raman, la Red Latinoamericana propuso un nuevo Workshop, el cual se realizaría durante el año 2015. Por lo que la primera validación de este algoritmo se realizó por comparación con resultados obtenidos usando los algoritmos de TROPOS de Alemania. Entre las mejoras adoptadas en el algoritmo Raman están el cálculo del overlap, y optimización de los cálculos de coeficientes ópticos de interés.

5.2.1. Día de Intercomparación

Las medidas utilizadas para la intercomparación fueron las medidas nocturnas realizadas con el Lidar MARTHA (Multiwavelength Atmospheric Raman Lidar for Temperature, Humidity, and Aerosol Profiling) el día 18 de Junio de 2013, entre las 20:00 y las 22:30 UTC. En la serie de tiempo de las medidas rango corregidas para ese día, se observan tres capas de aerosoles a distintas alturas, como muestra la Fig. 5.9. Para el análisis de medidas inelásticas, se utiliza un promedio temporal de un período de por lo menos dos horas para disminuir el ruido de éstas. Para este caso, se calcula el valor promedio de las medidas Lidar para todo el período mostrado anteriormente, por lo que se obtiene un sólo perfil para el período completo.

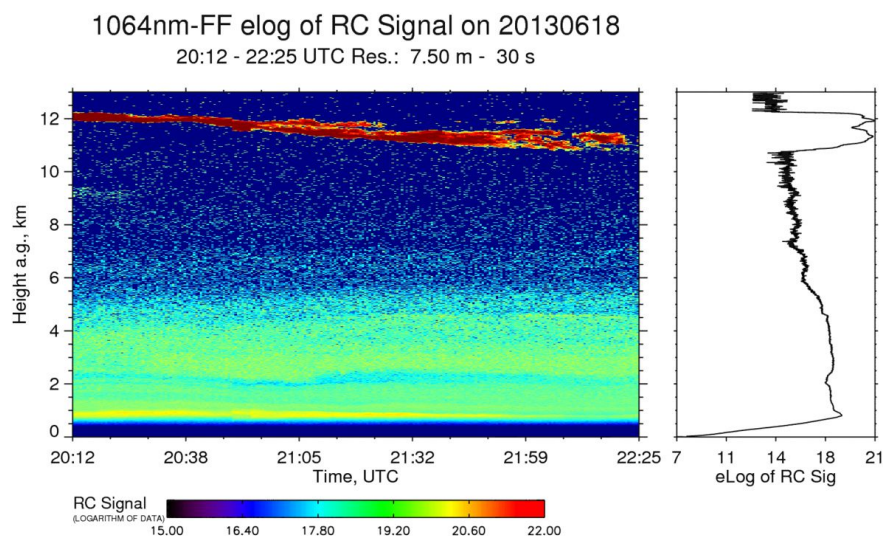


Figura 5.9: Serie de tiempo de las medidas rango corregidas obtenidas con el sistema Lidar-Martha del Instituto TROPOS para el 18 de Junio de 2012 entre las 20:00 y las 22:30 UTC para 1064 nm donde se observan tres capas de aerosoles a distintas alturas. [TROPOS]

5.2.2. Validación por Comparación del Algoritmo para Análisis de Medidas Raman

Para la validación del algoritmo de medidas Raman del sistema Lidar-CEFOP, se procedió a analizar el mismo día de medida, con las mismas condiciones para ambos algoritmos. El ruido de fondo se tomó de los valores de la señal entre los 30 km y los 50 km, por lo que el promedio de la señal en este tramo se sustrajo de la señal lidar. Para los datos meteorológicos, se tuvo acceso a datos de sondas que se lanzaban dos veces al día en Lindeberg, a 160 km de Leipzig, y que entregaban todos los datos necesarios para el análisis (perfiles de presión, temperatura, humedad y vapor de agua). Además, el instituto cuenta con un fotómetro solar con el que se obtuvo el valor del coeficiente de Angstrom. Para utilizar los métodos de inversión, se tomó una altura de referencia de 9 km, que deja fuera la capa más alta de aerosoles que muestra la Fig. 5.9, ya que ésta se encuentra en el límite de la tropósfera. Además, para el día de medida existían todas las condiciones necesarias de humedad y cielo despejado.

La validación se realizó comparando resultados específicos en ambos algoritmos. La longitud de onda emitida utilizada fue 355 nm y las longitudes de onda recibidas fueron 355 nm (elástico), 387 nm (Raman) y 408 nm (vapor de agua). Así, los resultados que se compararon en ambos algoritmos fueron los siguientes: curvas del comportamiento

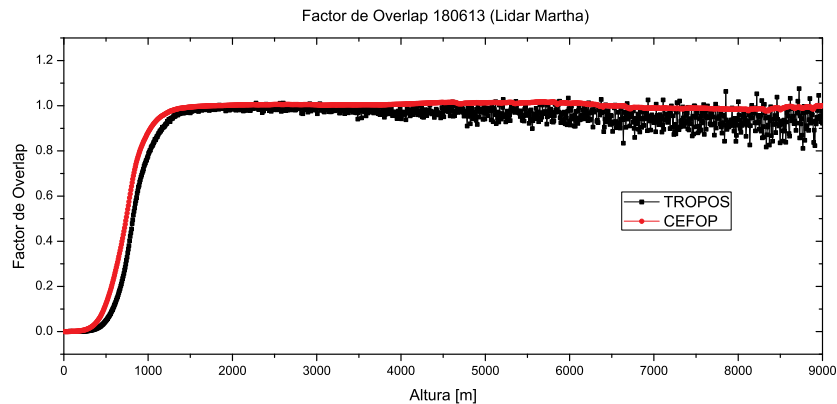


Figura 5.10: Comparación de las Curvas de Overlap para el sistema Lidar-MARTHA y el sistema Lidar-Cefop

del *overlap*, el coeficiente de backscattering para 355 nm calculado con el método elástico (Klett-Fernald) y con el método Raman y el factor de mezcla de vapor de agua (408 nm). Los datos obtenidos con nuestro algoritmo tienen un delay debido a que el sistema con el que se obtuvieron los datos con el que se comparó trabaja en algunos casos con un pre-trigger, modo de operación no considerado en el sistema Lidar-CEFOP.

Para comenzar, se compararon las curvas de *overlap* en ambos algoritmos. Lo que se debe comparar en este caso, es el valor desde donde ambas curvas alcanzan la unidad, es decir, desde donde se asegura que el haz laser está completamente contenido en el campo de visión del telescopio. En la Fig. 5.10, se ve que ambas curvas alcanzan este valor a los 250 bins, es decir, a los 1875 m. Este valor tan grande para la altura se explica debido al tamaño del espejo primario del sistema con el que se tomaron las medidas. El factor de correlación de las curvas es de 0.998, confirmando la similitud de las curvas comparadas.

Luego, se procedió a comparar las gráficas del coeficiente de backscattering para partículas calculado con ambos métodos, tanto el método de Klett-Fernald (caso elástico) como el de Raman, es decir, el backscattering elástico para 355 nm. De la curva para el caso del coeficiente de backscatterig utilizando el método de Klett-Fernald (Fig. 5.11), se obtuvo un factor de correlación de 0.885, pero además de este buen valor de correlación, se debe destacar la similitud del comportamiento desde la altura donde el overlap alcanza la unidad. Para el caso donde se obtuvo el mismo coeficiente pero utilizando el método combinado Elástico-Raman (Fig. 5.12), el factor de correlación es de 0.794, y aquí se observa el delay debido a que no se considera el pre-trigger mencionado anteriormente. A pesar de que el valor de esta correlación es el menor de todos los casos, sigue siendo bueno y aceptable para la intercomparación.

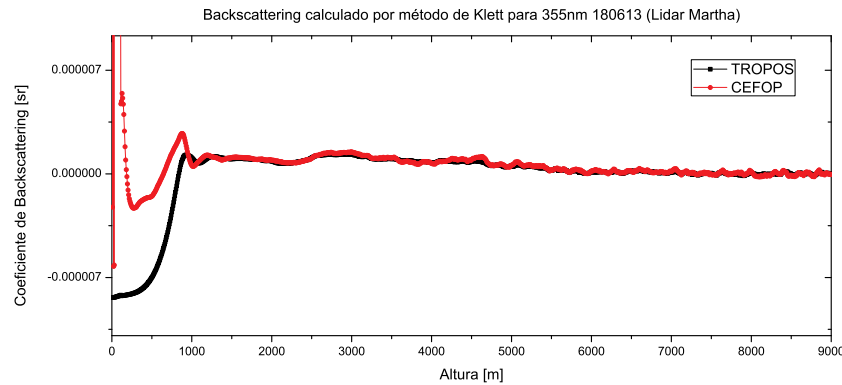


Figura 5.11: Comparación de las curvas del coeficiente de backscattering para partículas (355 nm) obtenido utilizando el método de Klett-Fernald. Para este caso, el factor de correlación obtenido fue de 0.885

Finalmente, se compararon las gráficas del factor de mezcla de vapor de agua. De la Fig. 5.13 se observa que las curvas obtenidas por ambos algoritmos tienen el mismo comportamiento, pero no los mismos valores. Esto es porque cada algoritmo calcula su factor de escala, utilizando métodos distintos y luego, al *escalar* las señales, los valores pueden diferir. A pesar de este escalamiento distinto, el factor de correlación es de 0.998.

5.2.3. Conclusiones

Luego de mejorar el Algoritmo de Inversión para datos elástico-Raman incluyendo las implementaciones del factor de overlap, las correcciones de la señal y las medidas del factor de mezcla de vapor de agua, éste fue comparado con el algoritmo de inversión utilizado por el grupo Lidar del Instituto TROPOS, se obtuvieron valores de correlación de las curvas de 0.998 para el factor de overlap, de 0.885 para el coeficiente de backscattering con el método de Klett-Fernald, de 0.794 para el coeficiente de backscattering obtenido con el método Raman y de 0.998 para el factor de mezcla del vapor de agua. Con estos valores de correlación, el algoritmo se considera validado por comparación.

En esta sección se ha presentado la primera etapa de validación del algoritmo de inversión combinado Elástico-Raman, y por lo tanto se ha realizado el primer procedimiento, cuyos pasos posteriormente serán realizados en la próxima reunión de trabajo de Algoritmos de Inversión de la Red Latinoamericana de Lidar.

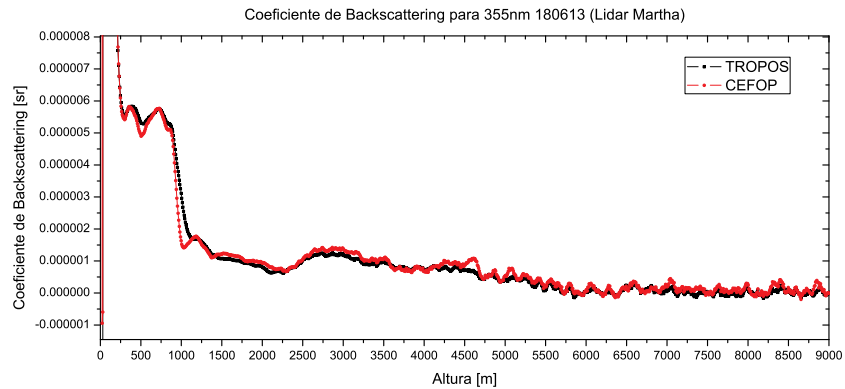


Figura 5.12: Comparación de las curvas del coeficiente de backscattering para aerosoles (355 nm) utilizando el método combinado elástico-Raman. El factor de correlación en este caso fue de 0.794

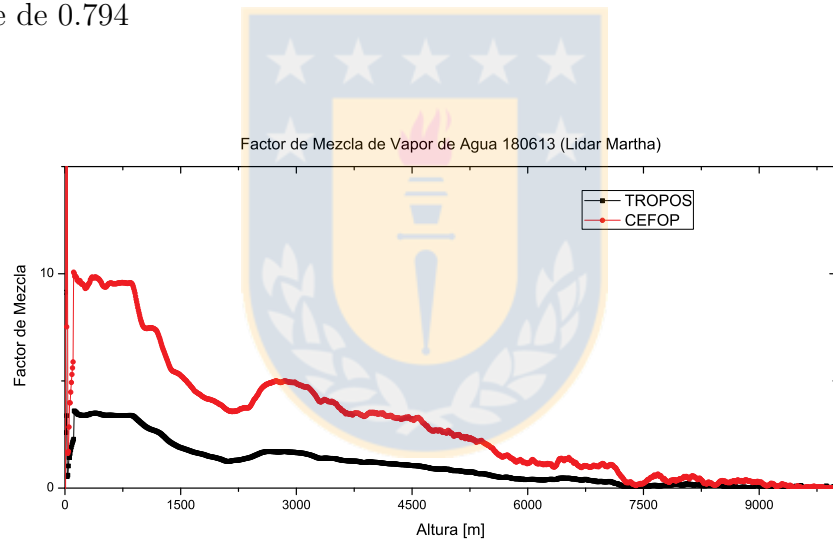


Figura 5.13: Comparación de las curvas del factor de mezcla de vapor de agua. El factor de correlación entre las curvas fue de 0.998

5.3. Mejoramientos Futuros del Algoritmo

En el futuro, los algoritmos de inversión pueden ser mejorados para lograr analizar datos con nubes no muy densas. Esta mejora consistiría en tomar un perfil vertical después de la nube (cuando ésta ya se ha ido) y utilizar el coeficiente de backscattering de este perfil como referencia para los perfiles con nubes, estos perfiles sólo se podrían utilizar hasta la altura donde se encuentra la nube, pero aumentarían considerablemente los días de medida para ser analizadas, e incluso permitiría recuperar medidas anteriores

que no fueron analizadas debido a la presencia de nubes.

Además, las medidas obtenidas con estos algoritmos de inversión pueden ser complementadas con medidas de otros instrumentos que forman parte del observatorio, como el MAX-DOAS.



Conclusiones

La técnica Lidar es una técnica de detección remota que permite medir propiedades ópticas de aerosoles y gases traza. A través de información continua que entrega, permite estudiar la evolución temporal, el transporte y el impacto de la contaminación urbana. En este trabajo se ha presentado la implementación del primer sistema Lidar desarrollado localmente, y que permite conocer el comportamiento de las partículas contaminantes en la ciudad de Concepción.

En la presente tesis se han presentado los fundamentos teóricos de la técnica Lidar y las características principales de los sistemas y del análisis de las señales Lidar.

Se ha presentado el primer sistema Lidar desarrollado localmente para medidas de aerosoles troposféricos en Concepción. Este sistema en una primera etapa fue un sistema elástico de un sólo canal (emisión y detección en 532 nm) y luego se mejoró pasando a ser un sistema multicanal (emisión en 355 nm y 532 nm y detección en 355 nm, 387 nm, 408 nm y 532 nm).

Se han desarrollado los algoritmos de inversión para el análisis de datos Lidar, los cuales permiten obtener los perfiles de coeficientes de extinción y backscattering para aerosoles, y el factor de mezcla para el vapor de agua. Ambos algoritmos utilizan datos satelitales provistos por un modelos de mesoescala (WRF). El algoritmo de inversión de datos elásticos utiliza el método de Klett-Fernald, y debe suponer un Lidar Ratio para resolver la ecuación Lidar elástica. En el caso de la ciudad de Concepción, este valor se asumió en 35 sr. En el caso del algoritmo de inversión de datos Raman, se necesita información adicional provista por un fotómetro solar (coeficiente de Angstrom) para resolver la ecuación Lidar inelástica y obtener los parámetros de interés.

Se han reportado las primeras medidas realizadas con el sistema Lidar, correspondientes a medidas elásticas. Estas se realizaron en el período Febrero-Septiembre de 2012, logrando el estudio estacional de las propiedades ópticas de los aerosoles en la ciudad de Concepción, y permitió el reconocimiento de *eventos* especiales debido a incendios forestales. Estas medidas fueron analizadas utilizando información complementaria de retrotrayectorias de masas de aire, incendios forestales cercanos al lugar de medida y pronósticos de presencia de sulfatos y/o humo. De las medidas en el período, se obtuvo que los valores máximos de los coeficientes de extinción y backscattering to-

man valores máximos a una altura de 530 m durante el verano, y a 170 m durante el invierno. Además, durante todo este periodo no se midieron capas de aerosoles sobre los 3 km. De esto, se obtuvo la variación estacional de los aerosoles en la ciudad de Concepción. Junto con este análisis, también se presentaron dos eventos de polución ocurridos en Abril de 2012, debido a incendios forestales.

Se han presentado los procedimientos de validación de los algoritmos de inversión a través de la inter comparación de resultados con otros algoritmos. En el caso del algoritmo de inversión de datos elásticos, se comparó con otros algoritmos de la Red Latinoamericana de Lidar en dos ocasiones: la primera en la primera campaña en conjunto de Lalinet, y luego en el Primer Workshop de Inversión de Señales Lidar de la Red, lo que permitió corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo de inversión. De las mejoras incluídas en estos procesos, al comparar los resultados obtenidos, las diferencias para 355 nm, 532 nm y 1064 nm se logró que fueran menores que $0.05 Mm^{-1}sr^{-1}$, $0.01 Mm^{-1}sr^{-1}$ y $0.06 Mm^{-1}sr^{-1}$ respectivamente, lo cual es aproximadamente un 0.1 %, 0.05 % y un 1 % de la señal de backscattering respectiva.

En el caso del algoritmo para datos inelásticos, éste fue comparado con el algoritmo del grupo Lidar perteneciente al instituto TROPOS de Leipzig, Alemania. En este caso, se compararon las señales obtenidas en cuatro etapas específicas del algoritmo logrando la primera validación de éste. Luego de las mejoras incluídas durante el proceso de validación, el factor de overlap alcanzó un factor de correlación de 0.998, de 0.885 para el coeficiente de backscattering con el método de Klett-Fernald, de 0.794 para el coeficiente de backscattering obtenido con el método Raman y de 0.998 para el factor de mezcla del vapor de agua. Con estos valores de correlación, el algoritmo se consideró validado.

Así, se han presentado las bases del primer observatorio Lidar del país, el cual permite realizar monitoreos sistemáticos de las propiedades ópticas de los aerosoles y estudiar la climatología de los aerosoles en la ciudad de Concepción.

5.4. Perspectivas del Trabajo

El trabajo presentado es el primero a nivel nacional con datos de un Lidar construído localmente. La ventaja principal de este sistema es que puede ser fácilmente modificado para futuras mejoras. Además, ya que los algoritmos de inversión también fueron desarrollados por el grupo, pueden ser modificados según las necesidades del observatorio.

Actualmente, el observatorio además del sistema Lidar, posee un fotómetro solar y un MAX-DOAS. Con los datos del fotómetro, que permite conocer el coeficiente de Angstrom, se podría realizar el procesamiento de las medidas para los cuatro canales del sistema, obteniendo los coeficientes de backscattering y extinción de aerosoles y el

factor de mezcla de vapor de agua, para realizar un reporte de las primeras medidas inelásticas en la ciudad de Concepción, e incluir en la variación estacional los nuevos parámetros que se obtienen con las medidas Raman. Además, con las medidas de vapor de agua, se podría continuar el estudio de la higroscopicidad de los aerosoles. Por otro lado, el MAX-DOAS también podrá aportar con datos de AOD y vapor de agua, los cuales pueden ser intercomparados con los obtenidos con el sistema Lidar.

Además, uno de los trabajos pendientes es la validación del algoritmo de inversión de datos Raman con los algoritmos de la Red Latinoamericana. Además de las futuras campañas en conjunto que puedan ser realizadas.





Bibliografía

- [Ackerman & Chung, 1992] Ackerman, S. & H. Chung (1992). Radiative Effects of Airborne Dust on Regional Energy Budgets at the Top of the Atmosphere. *Journal of Applied Meteorology* 31, 223-233 .
- [Ackerman *et al.*, 2000] Ackerman, S., O. B. Toon, D. E. Stevens, A. J. Heymsfield, V. Ramanathan, E. J. Welton (2000). Reduction of tropical cloudiness. *Science* 288, 1042-1047.
- [Albretch, 1989] Albrecht, B. A. (1989). Aerosols clouds and microphysics. *Science* 245, 1227-1230.
- [Angstrom A., 1964] Angstrom, A. (1964). The parameters of atmospheric turbidity, *Tellus*, 16 (1), 64-75.
- [Ansmann *et al.*, 1990] Ansmann A., M. Riebesell, C. Weitkamp (1990). Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman Lidar, *Optics Letter* 15, 746-748.
- [Ansmann *et al.*, 1992] Ansmann A, U. Wandinger, R. Maren, C. Weitkamp, M. Walfried (1992). Independent measurements of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar, *Applied Optics* 31, 7113-7131.
- [Ansmann *et al.*,1992] Ansmann A., M. Riebesell, U. Wandinger, C. Weitkamp, F. Voss, W. Lahmann, W. Michaelis. Combined Raman Elastic-Backscatter LIDAR for Vertical Profiling of Moisture, Aerosol Extinction, Backscatter, and LIDAR Ratio, *Applied Physics B*, 55, 18-28.
- [Ansmann *et al.*, 2000] Ansmann, A., D. Althausen, U. Wandinger, K.Franke, D. Muller, F.Wagner, J. Heintzenberg(2000). Vertical profiling of the Indian aerosol plume with six-wavelength lidar during INDOEX: A first case study. *Geophysical Research Letters* 27, 963-966.
- [Ansmann *et al.*, 2001] Ansmann, A., F. Wagner, D. Althausen, D. Muller, A. Herber, U. Wandinger (2001). European pollution outbreaks during ACE 2: Lofted aerosol plumes observed with Raman lidar at the Portuguese coast. *J. Geophysical Research* 106, (20)725-734.

- [Ansmann *et al.*, 2005] Ansmann, A., R. Engelmann, D. Althausen, U. Wandinger, M. Hu, Y. Zhang, Q. He (2005). High aerosol load over the Pearl River Delta, China, observed with Raman lidar and Sun photometer. *Geophys. Res. Lett.* *32*, L13815.
- [Balis *et al.*, 2000] Balis, D., A. Papayannis, E. Galani, F. Marengo, V. Santacesaria, E. Hamonou, P. Chazette, I. Ziomas, C. Zerefos (2000). Tropospheric Lidar aerosol measurements and sun photometer observations at Thessaloniki, Greece, *Atmospheric Environment* *34*, 925-932.
- [Barbosa *et al.*, 2014] Barbosa, H. M. J., B. Barja, T. Pauliquevis, D.A. Gouveia, P. Artaxo, G.G. Cirino, R.M.N. Santos, A.B. Oliveira (2104). A permanent raman lidar station in the Amazon: description, characterization and first results. *Atmospheric Measurement Technology* *7*, 1745-1762.
- [Barbosa *et al.*, 2014] Barbosa, H.M.J., D.A. Gouveia, F.J.S. Lopes, E. Landulfo, A. Silva, C. Jimenez, E. Montilla, D. Nisperuza, A. Bastidas, B. Barja, P. Ristori, E.J. Quel, G.L. Mariano (2014). The first ALINE measurements and intercomparison exercise on lidar inversion algorithms. *Optica Pura y Aplicada* *47*, (2)99-108.
- [Bates, 1984] Bates D.R. (1984). Rayleigh scattering by air, *Planet. Space Sci* *32*, 785-790.
- [Bodhaine *et al.*, 1999] Bodhaine, B., N. Wood , E. Dutton, J. Slusser (1999). On Rayleigh Optical Depth Calculations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* *16*, 1854-1861.
- [Boeckmann *et al.*, 2004] Boeckmann C., U. Wandinger , A. Ansmann , J. Boesenberg , V. Amiridis, A. Boselli, A. Delaval, F. De Tomasi, M. Frioud, A. Hagard, M. Horvat, M. Iarlori, L. Komguem, S. Kreipl, G. Larcheveque, V. Matthias, A. Papayannis, G. Pappalardo, F. Rocadenbosch, J.A. Rodriguez, J. Schneider, V. Shcherbakov, M. Wiegner (2004), Aerosol lidar intercomparison in the framework of EARLINET: Part II-Aerosol backscatter algorithms, *Applied Optics* *43*, (4)977-989.
- [Bruegge *et al.*, 1992] Bruegge, C.T., J.E. Conel, R.O. Green, J.S. Margolis, R.G. Holm, G. Toon (1992). Water vapor column abundance retrievals during FIFE. *J. Geophys. Res.* *97*, (18)759-768.
- [Bucholtz, 1995] Bucholtz, A. (1995). Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics* *34*, (15)2765-2773.
- [Carvacho *et al.*, 2004] Carvacho, O.F, K. Trzepla-Nabaglo, L.L. Ashbaugh, R.G. Flochini, P. Melín, P. Celis (2004). Elemental composition of springtime aerosol in Chillán, Chile. *Atmospheric Environment* *38*, 5349-5352.
- [Carvacho *et al.*, 2014] Carvacho O.F., K. Trzepla-Nabaglo, L.L. Ashbaugh, R.G. Flochini , P.Melín, J. Celis (2004). Technical Note: Elemental composition of springtime aerosol in Chillan, Chile, *Atmospheric Environment* **38**, 5349-5352 .

- [Davies *et al.*, 2004] Davies, D., S. Kumar, J. Descloitres (2004). Global fire monitoring using MODIS near-real-time satellite data. *GIM International* 18,(4)41-43.
- [Draxler & Rolph, 2003] Draxler, R. R. & G. D. Rolph (2003). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>.
- [Fernald, F., 1984] Fernald, F.G. (1984). Lidar Inversion with variable backscatter/extinction ratios, *App. Opt.* 23, 652-653.
- [Giglio *et al.*, 2003] Giglio, L., J. Descloitres, C.O. Justice, Y.J. Kaufman (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87,(2-3)273-282.
- [Goldsmith *et al.*, 1998] Goldsmith J. E. M., F.H. Blair, S.E. Bisson, D.D. Turner (1998). Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosol. *Appl. Optics* 37, 4979-4990.
- [Gramsch *et al.*, 2014] Gramsch, E., E. Reyes, P. Oyola, R. Ma, G. López, P. Pérez, R. Martínez (2002). Particle size distribution and its relationship to black carbon in two urban and a rural site in Santiago de Chile. *Journal of Air and Waste Management Association* 64, (7)785-796.
- [Guerrero-Rascado et al (2014)] Guerrero-Rascado, J.L., E. Landulfo, J.C. Antuña, H.M.J. Barbosa, B. Barja, A. Bastidas, A. Bedoya, R. da Costa, R. Estevan, R. Forno, D. Gouveia, C. Jiménez, E. Larroza, F.J.S. Lopes, E. Montilla-Rosero, G. Moreira, W. Nakaema, D. Nisperuza, D. Alegria, M. Munera, L. Otero, S. Papan-drea, J. Pallota, E. Pawelko, E. Quel, P. Ristori, P.F. Rodrigues, J. Salvador, M.F. Sanchez, A. Silva (2014). Latin American Lidar Network (LALINET): a diagnostic on networking instrumentation. *Journal of Applied Remote Sensing*, in review.
- [Hegg *et al.*, 1993] Hegg, D. A., R. J. Fereck, P. V. Hobbs (1993). Light scattering and cloud condensation nucleus activity of sulfate aerosol measured over the northeastern Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res* 102, 25293-25303.
- [IPCC 2013] Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (2013), IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change . Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [IPCC 2014] Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (2014). IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- [Jimenez 2014] Jimenez C. (2014). Determinación del efecto de la Humedad en el Scattering de Aerosoles Atmosféricos, Tesis de Magister, Universidad de Concepción.
- [Klett, 1981] Klett J. (1981). Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics* 20, 211.
- [Klett, 1983] Klett J. (1983). Lidar calibration and extinction coefficients, *Applied Optics* 22, 514-515.
- [Klett, 1985] Klett, J. (1985). Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Applied Optics* 24, (11)1638-1643.
- [Kobayashi, 1987] Kobayashi T. (1987). Techniques for Laser Remote Sensing of the Environment, *Rem. Sens. Rev.* 3, 1.
- [Kovalev & Eichinger, 2004] Kovalev V. and W. Eichinger (2004). Elastic Lidar: Theory, Practice and Analysis Methods, *Ed. John Wiley & Sons*.
- [LALINET, 2014] Report of the inversion unified algorithm working group, I Workshop on Lidar Inversion Algorithms-LALINET (2014).
- [Landulfo *et al.*, 2003] Landulfo, E., A. Papayannis, P. Artaxo, A. Castanho, A. de Freitas, R.F. Souza, N. Vieira junior, M. Jorge, O. Sanchez-Ccoyllo, D. Moreira (2003). Synergetic measurements of aerosols over Sao Paulo, Brazil using Lidar, sunphotometer and satellite data during the dry season, *Atmos. Chem. Phys.* 3, 1523-1539.
- [Landulfo *et al.*, 2008] Landulfo, E., A. Papayannis, A.S. Torres, S.T. Uehara, L.M.V. Pozzetti, C.A. de Matos, P. Sawamura, W.M. Nakaema, W. Jesus (2008). A four-year lidar-sun photometer aerosol study at Sao Paulo, Brazil. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25, 1463-1468.
- [Landulfo *et al.*, 2010] Landulfo, E., F.J. Lopes, G.L. Mariano, A.S. Torres, W.C. de Jesus, W.M. Nakaema, M.P. Jorge, R. Mariani (2010). Study of the Properties of Aerosols and the Air Quality Index Using a Backscatter Lidar System and Aeronet Sunphotometer in the City of Sao Paulo, Brazil. *Journal of Air and Waste Management Association* 60, (4)386-392.
- [Lenoble, 1993] Lenoble, J. (1993). *Atmospheric radiative transfer*. A. Deepak Publishing, Hampton, VA, 532 pp.
- [Measure, 1984] Measure R. (1984). Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, *John Wiley Sons*.
- [Mie, 1908] Mie, G. (1908). Beitrage zur Optik truber medien, speziell kolloidaler metallocungen. *Ann. Phys.* 330, (3) 377-445.

- [Mortier *et al.*, 2013] Mortier, A., P. Goloub, T. Podvin, C. Deroo, A. Chaikovsky, N. Ajtai, L. Blarel, D. Tanre, Y. Derimian (2013). Detection and characterization of volcanic ash plumes over Lille during the Eyjafjallajökull eruption. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 3705-3720.
- [Muñoz & Alcaful, 2012] Muñoz, R. and R. Alcaful (2012). Variability of Urban Aerosols over Santiago, Chile: Comparison of Surface PM_{10} Concentrations and Remote Sensing with Ceilometer and Lidar, *Aerosol and Air Quality Research* 12, 8-19.
- [Nicolae & Cristescu, 2006] Nicolae D. and C.P. Cristescu (2006)., Laser remote sensing of tropospheric aerosol, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 8, 1781-1795.
- [Nicolet M, 1984] Nicolet M., On the molecular scattering in the terrestrial atmosphere: an empirical formula for its calculation in the homosphere, *Planet. Space Sci.* 32, 1467-1468.
- [Pappalardo *et al.*, 2004] Pappalardo G., A. Amodeo, M. Pandolfi, U. Wandinger, A. Ansmann, J. Boesenberg, V. Matthias, V. Amiridis, F. De Tomasi, M. Frioud, M. Iarlori, L. Komguem, A. Papayannis, F. Rocadenbosch, X. Wang, (2004). Aerosol Lidar Intercomparison in the Framework of the EARLINET Project. 3. Raman Lidar Algorithm for Aerosol Extinction, Backscatter, and Lidar Ratio, *Applied Optics* 43, (28)5370-5385.
- [Penndorf R., 1957] Penndorf, R. (1957). Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 m and their application to atmospheric optics. *J. Opt. Soc. Amer.* 47, 176-182.
- [Raman C., 1930] Raman C. (1930). The molecular scattering of light, *Nobel Lecture*.
- [Reichardt *et al.*, 1996] Reichardt J., U. Wandinger, M. Serwazi, C. Weitkamp (1996). Combined Raman lidar for aerosol, ozone and moisture measurements, *Opt. Eng* 5, 1457-1465.
- [Schmidt *et al.*, 2013] Schmidt J., U. Wandinger, A. Malinka (2013). Dual-field-of-view Raman lidar measurements for the retrieval of cloud microphysical properties, *Applied optics* 11, (52)2235-2247.
- [Silva *et al.*, 2012] Silva A., E. Montilla-Rosero , C. Jimenez , C. Saavedra, R. Hernández (2012). Tropospheric Measurements of Aerosol Optical Properties at Concepcion (36S, 73W), *Proc. 26th International Laser Radar Conference (26th ILRC)*, Vol I, 521-524, Porto Heli, Greece.
- [Stull, 1988] Stull R. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology, *Kluwer Academic Publishers*, 1-14.

- [TROPOS] Quicklook Archive of EARLINET Lidar MARTHA <http://lacros.rsd.tropos.de/martha/quicklook.php?year=2013&month=6&day=18&plot=1>
- [Wandinger *et al.*, 2002] Wandinger U., D. Muller, C. Bockmann, D. Althausen, V. Matthias, J. Bosenberg, V. Weiß, M. Fiebig, M. Wendisch, S. Stohl, A. Ansmann (2002). Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multiwavelength lidar and aircraft measurements. *Journal of Geophysical Research* 107, (D21)8125.
- [WebFinance] Business Dictionary <http://www.businessdictionary.com/definition/pollution.html>
- [Whiteman *et al.*, 1992] Whiteman D.N., S.H. Melfi, R.A. Ferrare (1992). Raman Lidar System for the Measurement of Water and Aerosol in the Earth's Atmosphere. *Appl. Optics* 31, 3068-3082.

