

EVALUACIÓN DE UN ALGORITMO DE DETERMINACIÓN DE PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE AEROSOLES EN BASE A MEDICIONES COMBINADAS DE LIDAR Y FOTÓMETRO SOLAR

EVALUATION OF AN ALGORITHM FOR THE DETERMINATION OF AEROSOL CONCENTRATION PROFILES USING COMBINED LIDAR AND SUN PHOTOMETER MEASUREMENTS

J.L. Bali^{*1,2}, M.E. Herrera^{1,3}, P.R. Ristori^{3,4}, L.A. Otero^{1,3,5}, A.D. Acquesta^{2,6},
and E.J. Quel^{3,4,5}

¹Consejo Nacional de Investigaciones Cientificas y Tecnicas (CONICET) - Godoy Cruz 2290 - (C1425FQB) C.A.B.A. - Argentina

²Departamento de Modelado y Manejo de Crisis - DMMC, CITEDEF - Juan Bautista de La Salle 4397 - (B1603ALO) Villa Martelli - Provincia de Buenos Aires - Argentina

³CEILAP - UNIDEF (MINDEF-CONICET) - CITEDEF - Juan Bautista de La Salle 4397 - (B1603ALO) Villa Martelli - Provincia de Buenos Aires - Argentina

⁴Universidad Tecnologica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires - Medrano 951 - (C1179AAQ) C.A.B.A. - Argentina

⁵Escuela Superior Tecnica Grl. Div. Manuel N. Savio - Facultad del Ejercito - Universidad de la Defensa Nacional - Av. Cabildo 15 - (C1426AAA) C.A.B.A. - Argentina

⁶Pontificia Universidad Catolica Argentina - Av. Alicia Moreau de Justo 1300 - (C1107AAZ) Buenos Aires - Argentina

Recibido: 29/09/17; aceptado: 14/05/18

LiRIC es un procedimiento de inversión muy utilizado en la red EARLINET que permite la obtención de perfiles verticales de concentración de aerosoles, mediante el empleo de mediciones provenientes de dos instrumentos, lidar y fotómetro solar. En este trabajo se propone una reimplementación de dicho algoritmo en el lenguaje libre Python, junto con un estudio de casos sintéticos, destacando la robustez y el buen funcionamiento del mismo. Finalmente, se complementa el estudio con un caso de mediciones reales, bajo un evento registrado de quema de biomasa medido en la estación de monitoreo de Villa Martelli.

Palabras Clave: concentración, aerosoles, lidar.

LiRIC is an inversion procedure frequently used in the EARLINET network that is able to obtain vertical aerosol concentration profiles, using measurements from two instruments: Lidar and sun photometer. In this paper, we propose a reimplementation of that algorithm in the free language Python. We also did some synthetic scenarios studies which shows the robustness and the proper functioning of the tool. Finally, we proceeded with a study in a real case scenario, under a registered event of biomass burning in the monitoring station of Villa Martelli.

Keywords: concentration, aerosols, lidar.

I. INTRODUCCIÓN

Diversos fenómenos de erupciones volcánicas acaecidos en territorio Argentino (Puyehue, Cordón-Caulle, en el año 2011,^{1,2} y Calbuco, en al año 2015³), importantes quemadas de biomasa y la presencia de polvo patagónico, han provocado diferentes efectos negativos sobre la calidad de aire, el tránsito aéreo y la ganadería, entre otros. Una necesidad que surge a partir de dichas problemáticas, es el estudio de méto-

dos de sensado remoto y procesamiento de señales que permitan caracterizar aspectos microfísicos del material particulado, fundamentalmente la concentración volumétrica, y eventualmente, con conocimiento adicional que puede provenir de una tipificación másica.

Este trabajo presenta un algoritmo que calcula perfiles de concentración en altura combinando la información de dos instrumentos. El primero es el Lidar (acrónimo de Light Detection and Ranging), un sistema de sensado remoto activo que permite obtener medidas discriminadas en altura con alta resolución

¹jballi@citedef.gob.ar

espacial. La información directa que ofrece es retrodispersión en altura, usualmente medida en varias longitudes de onda. Mediante algunos procedimientos tradicionales, como los algoritmos de Klett,^{4,5} Fernald⁶ y Sasano,⁷ y algunos supuestos, es posible recabar información óptica sobre los aerosoles, en diversas longitudes de onda. El segundo instrumento es el fotómetro solar, un equipo de sensado remoto pasivo que mide la irradiancia solar directa y también la difusa en varias longitudes de onda. Con esta información calcula la información óptica y microfísica de la columna vertical de aerosoles empleando mecanismos de inversión como los presentados por Dubovik y King.⁸ Combinando las capacidades del lidar de medir perfiles de retrodifusión en altura con las del fotómetro solar de medir propiedades microfísicas de aerosoles es posible aprovechar la sinergia de ambos instrumentos para calcular el perfil vertical de concentraciones volumétrica de distintos tipos de aerosoles. Este perfil es importante para cuantificar la masa de cenizas volcánicas en suspensión que puede afectar rutas aéreas y aeropuertos; la masa de polvo patagónico que, una vez depositado en el océano, provee cantidades críticas de micronutrientes como el hierro al fitoplancton; la masa de material particulado que, una vez dentro del sistema respiratorio, tiene una penetración en las vías aéreas que depende del tamaño del mismo.

En este trabajo se analizará el procedimiento Lidar/Radiometer Inversion Code (LiRIC) que combina ambos tipos de medición para devolver un perfil vertical de concentración volumétrica para dos tipos de aerosoles: fino y grueso. El software fue originalmente desarrollado por Chaikovsky et al. (2008)⁹ y analizado en Wagner et. al. (2013).¹⁰ Emplea mediciones lidar de canales elásticos en las longitudes de onda 355 nm , 532 nm y 1064 nm , y los datos obtenidos por el producto de inversión de fotómetro de la red Aerosol Robotic Network (AERONET). LiRIC, si bien es un programa funcional, es cerrado y de difícil ejecución y automatización. Además requiere el uso de varios paquetes de software comercial, a mencionar Windows y Microsoft Access. Es importante señalar que en este trabajo no se ejecutó la versión original del LiRIC propuesta por Chaikovsky et al. (2008)⁹ y Wagner et al. (2013)¹⁰ sino una reimplementación del mismo desarrollada íntegramente en lenguaje libre Python, al que denominamos LiRIC-CITEDEF. De esta forma hemos desarrollado una nueva tecnología que no requiere del uso de paquetes comerciales y es fácil de automatizar mediante el acceso a una librería de funciones.

Esta implementación basada en el algoritmo LiRIC tiene como finalidad ser distribuida libremente una vez que la misma sea probada de forma extensiva a diversos escenarios. Creemos necesario que sus resultados sean contrastados con los algoritmos ya vigentes y los detalles de su código sean debidamente presentados, discutidos y publicados para su evaluación

por la comunidad científica internacional.

Al mismo tiempo hemos desarrollado un simulador de atmósfera que nos permite cargar un archivo de radiosondeo para obtener una descripción molecular de la atmósfera, y también definir perfiles de concentración en dos modos (fino y grueso). A partir de esas informaciones, el simulador devuelve las medidas que hubiese obtenido el lidar y el fotómetro solar, a fin de servir como entrada al LiRIC. Esta pieza del software es fundamental para probar la efectividad del algoritmo.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO LiRIC

El LiRIC es un algoritmo que combina las mediciones de dos instrumentos, el lidar y el fotómetro solar, mediante una inversión secuencial para obtener la distribución vertical de la concentración volumétrica de aerosoles en su modo fino y grueso. En primer lugar se toman los datos del fotómetro, ya procesados en NASA de acuerdo al algoritmo de inversión estándar de la red AERONET, y luego se realiza el procesamiento de las señales lidar con estos resultados. Para dicho procedimiento de inversión se tienen en cuenta algunos supuestos:¹⁰ i) el índice de refracción es el mismo para las partículas del modo fino y grueso; ii) las mediciones lidar con las provenientes de AERONET, se encuentran sincronizadas. Finalmente, se puede esquematizar al proceso empleado por el LiRIC en tres simples pasos:

1. obtención de los datos provenientes del fotómetro solar, ya procesados por el algoritmo de AERONET, y aquellos provenientes de la señales lidar;
2. preparación de los datos. Es decir, a partir de la base de datos, se realiza un post-procesamiento para adaptar los mismos a la entrada requerida por el siguiente paso;
3. modelado inverso y obtención de los parámetros que minimizan las discrepancias entre las señales medidas y la modelada, con el objetivo de hallar los perfiles de concentración en altura.

III. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA

Lidar

El algoritmo LiRIC utiliza datos provenientes de sistemas lidar. Los mismos proporcionan información en altura para cada uno de los canales de medición. Particularmente en esta reimplementación serán empleadas señales lidar de retrodispersión elástica de los canales que miden en las longitudes de onda $\lambda_1 = 355\text{ nm}$, $\lambda_2 = 532\text{ nm}$ y $\lambda_3 = 1064\text{ nm}$.

El algoritmo de inversión requiere que un programa realice un tratamiento previo a las mediciones. Éste permite obtener ciertos parámetros de interés, que serán empleados posteriormente en el procedimiento

de inversión, y realizar diversas correcciones con la finalidad de mejorar la performance del mismo. La señal lidar, que describe el comportamiento entre el haz láser y su interacción con la atmósfera, tiene la siguiente expresión matemática:

$$P(\lambda_i, z) = P_o(\lambda_i) \frac{E(\lambda_i)O(z)}{z^2} \beta(\lambda_i, z) \exp\left(-2 \int_o^z \alpha(\lambda_i, z') dz'\right) \quad (1)$$

donde $P(\lambda_i, z)$ es la potencia recibida del láser, $P_o(\lambda_i)$ es la potencia emitida por el láser, $E(\lambda_i)$ es la función del sistema que describe la eficiencia del receptor óptico y del sistema de detección, $O(z)$ es la función de superposición, $\beta(\lambda_i, z)$ es el coeficiente de retrodispersión total (moléculas y aerosoles), $\alpha(\lambda_i, z)$ es el coeficiente de extinción total y z es la altura. En su propagación en la atmósfera, y dependiendo de los parámetros ópticos con los que fue diseñado el sistema, la alineación de la óptica de envío y la de detección, el haz láser puede no entrar, entrar parcialmente o de forma total en el campo de visión del detector, siendo posible representar la función de superposición con un valor entre 0 y 1 dependiendo de la altura.¹¹ De no ser posible calcularla, medirla o modelarla las observaciones con importantes desarrollos convectivos en las que se asume una capa límite homogéneamente mezclada permiten aproximar el valor de esta función a obtenerse. La supresión del valor medio del ruido de señal se realiza eliminando el valor correspondiente al corrimiento de la línea base debido a la luz del cielo obtenida por el detector, el ruido del instrumento y cualquier otro sesgo que pudiera ser agregado a la señal. Cabe aclarar que debido a que la medición lidar se obtiene promediando perfiles durante un intervalo de tiempo (en nuestro caso 300 perfiles en un intervalo de 10 segundos), y que este promedio tiene una relación señal a ruido baja, es necesario promediar aún más la señal (por ejemplo cada 15 minutos). En esta condición se asume que el promedio es representativo de las propiedades atmosféricas. Finalmente, con lo expuesto, se puede reescribir la ecuación (1) normalizada a una altura de referencia que representa uno de los datos de entrada al algoritmo LiRIC:

$$L_i(z) = \frac{S(\lambda_j, z)}{S(\lambda_i, z_{ref})} R(\lambda_i, z_{ref}) \beta_{mol}(\lambda_i, z_{ref}) \exp(-2\tau_{mol}(\lambda_i, z, z_{ref})) \quad (2)$$

donde $S(\lambda_i, z) = P(\lambda_i, z)z^2$. $\beta_{mol}(\lambda_i, z_{ref})$ es la retrodispersión molecular en z_{ref} , la altura de referencia. $R(\lambda_i, z_{ref})$ es la razón de retrodispersión, definida como el cociente entre la retrodispersión total (de aerosoles y moléculas) y la molecular en z_{ref} ; y $\tau_{mol}(\lambda_i, z, z_{ref})$ es el espesor óptico molecular entre

z_{ref} y z , es decir,

$$\tau_{mol}(\lambda_i, z, z_{ref}) = \int_{z_{ref}}^z \alpha(\lambda_i, z') dz' \quad (3)$$

Los términos que describen propiedades moleculares provienen de los datos de presión y temperatura de un radiosondeo.

Otros parámetros de importancia para la inversión son las alturas máxima, mínima y de referencia. La selección de esta última por lo general es considerada al final del rango sensado puesto que la contribución de los aerosoles a la retrodispersión se considera despreciable.

La presencia de aerosoles en esta altura de referencia es parcialmente corregida durante la ejecución del LiRIC puesto que realiza un ajuste en el factor de relación de retrodispersión R . Generalmente se toma una altura máxima cercana a la tropopausa, exceptuando los casos de erupción volcánica. La altura mínima no debe verse afectada por el factor de superposición; por debajo de esa altura los valores de retrodispersión se consideran constantes.

Fotómetro Solar

El algoritmo LiRIC utiliza los datos provenientes de un fotómetro solar. Se realizan mediciones de la radiación solar directa y difusa en varias longitudes de onda, y a partir de las mismas se efectúa un procedimiento de inversión el cual permite obtener una estimación de las propiedades microfísicas de los aerosoles, tales como la distribución columnar de tamaños de partículas discriminado en modos finos y gruesos, según un criterio de separación propio del esquema AERONET. Los detalles del algoritmo se encuentran en Dubovik y King⁸ y en Dubovik et al.,¹² en donde se incorporó la discriminación de esferoides. El procedimiento de inversión devuelve también índices complejos de refracción para las longitudes de onda del fotómetro solar, sin discriminación por tipo, y funciones de fase de la dispersión. El procedimiento LiRIC no utiliza directamente los datos medidos por el fotómetro sino los ya procesados por los algoritmos de inversión de la red. De estos valores se destacan V_f , V_c ; que son estimadores de la concentración volumétrica de particulado fino y grueso integrados en la columna vertical. Otros datos que están expresados en longitud de onda sirven para vincular las concentraciones a los perfiles verticales medidos con el lidar. El algoritmo de preprocesamiento del LiRIC adapta estos valores a las longitudes de onda de los canales elásticos del lidar (en nuestro caso $\lambda_1 = 355 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ y $\lambda_3 = 1064 \text{ nm}$). Con ellos el LiRIC calcula los valores y el valor promedio por unidad de volumen de extinción $a_j(\lambda_i)$ y retrodispersión $b_j(\lambda_i)$ de particulado fino ($j = f$) y grueso ($j = c$), para las tres longitudes de onda λ_i . El algoritmo calcula los valores $a_j(\lambda_i)$ a partir del espesor óptico de aerosoles y los valores $b_j(\lambda_i)$ en función de la función de fase en 180° ; en ambos casos escala a la longitud de onda del lidar empleando la ley de Angström.¹³ A los fines de

este trabajo, el radio a partir del cual el particulado pasa de fino a grueso es $0,5 \mu m$.

IV. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

El algoritmo central del LiRIC toma como entrada las salidas de los procedimientos descritos en la sección anterior y trata de maximizar la sinergia entre los resultados obtenidos por cada uno de los instrumentos.

El fotómetro provee información de radiancia espectral solar a distintos ángulos de observación que es empleada por los algoritmos de la red AERONET para ofrecer las propiedades microfísicas de la columna total de aerosoles siguiendo el esquema propuesto por Dubovik y King (2000).⁸ El lidar mide la retrodispersión espectral de la atmósfera atenuada por el camino óptico recorrido en función de la altura.

Con esta información se ejecuta un algoritmo de inversión iterativa, como mecanismo de ajuste (Wagner et al.,¹⁰ Chaikovsky et al. (2016)¹⁴). El algoritmo estima como solución inicial una concentración discriminada en altura igual a $C(z)$ que es la suma de dos perfiles constantes de particulado fino $C_f(z)$ y grueso $C_c(z)$, y una razón de dispersión $R(\lambda_j, z_{ref})$ igual a 1, 1 en una altura de referencia z_{ref} , donde la concentración de aerosoles es muy pequeña. A partir de estos valores el esquema iterativo evalúa y trata de minimizar la suma de tres funcionales positivos: Ψ_1 , Ψ_2 y Ψ_3 , que dependen de la concentración y la razón de dispersión. El primero (Ψ_1) cuantifica la discrepancia entre la señal lidar y un perfil sintético. Para esto el algoritmo primero calcula la retrodispersión y la extinción como

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_{aer,j}(\lambda_i, z) &= C_j(z)b_j(\lambda_i) \\ \hat{\alpha}_{aer,j}(\lambda_i, z) &= C_j(z)a_j(\lambda_i)\end{aligned}\quad (4)$$

siendo i la longitud de onda y j el modo fino o grueso. Luego calcula los valores totales sumando los modos:

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_{aer}(\lambda_i, z) &= \hat{\beta}_{aer,f}(\lambda_i, z) + \hat{\beta}_{aer,c}(\lambda_i, z) \\ \hat{\alpha}_{aer}(\lambda_i, z) &= \hat{\alpha}_{aer,f}(\lambda_i, z) + \hat{\alpha}_{aer,c}(\lambda_i, z)\end{aligned}\quad (5)$$

Estos valores permiten obtener una expresión del perfil sintético similar (ecuación 2) tal que el valor de \hat{L} es:

$$\hat{L}(\lambda_i, z) = \frac{(\hat{\beta}_{aer}(\lambda_i, z) + \beta_{mol}(\lambda_i, z))}{\exp(2\hat{\tau}(\lambda_i, z, z_{ref}))}\quad (6)$$

donde $\hat{\tau}(\lambda_i, z, z_{ref})$ es calculado como:

$$\hat{\tau}(\lambda_i, z, z_{ref}) = \int_{z_{ref}}^z \hat{\alpha}(\lambda_i, z') dz' \quad (7)$$

Si definimos la discrepancia $d(z_i, \lambda_j)$ como la resta entre \hat{L} y L , luego queda que:

$$\Psi_1(C_j, R) = w_i \sum_{i=1}^I \sum_{k=0}^N d^2(z_k, \lambda_i) \frac{1}{\Omega_j} \quad (8)$$

siendo w_i un peso asociado a la discrepancia lidar para la longitud de onda i , e I el total de longitudes de onda consideradas (en nuestro caso sería $I = 3$ canales elásticos). Esta suma puede ser multiplicada por un factor de peso dependiente de la longitud de onda y otro que permite ponderar cada elemento en altura en función de su variabilidad. Ésta es producto de errores de medición y se representa como Ω_k . A este funcional Ψ_1 se lo denomina *factor lidar*, ya que toma en cuenta directamente los perfiles del lidar y penaliza las discrepancias entre la señal lidar verdadera y la simulada.

El segundo factor (Ψ_2) integra la concentración columnar de cada tipo de partícula (fino y grueso) en toda su altura y compara cada uno de esos valores con los que provee AERONET, V_f y V_c . Este factor se lo denomina como el *factor fotómetro*, ya que toma los totalizados producidos por el fotómetro y los compara con los que hubiese obtenido suponiendo dado perfiles $C_f(z)$ y $C_c(z)$. Calculamos el volumen columnar estimado como:

$$\hat{V}_j = \sum_{k=0}^N C_j(z_k) \Delta z \quad (9)$$

con k pudiendo ser f o c según el modo del particulado. Nos queda entonces que:

$$\Psi_2(C_{f,c}) = f_f(\hat{V}_f - V_f)^2 + f_c(\hat{V}_c - V_c)^2 \quad (10)$$

siendo f_k un factor de peso asociado al modo de partícula, para el término de fotómetro. V_j son los volúmenes columnares provenientes del posprocesamiento de los productos de AERONET. El tercer factor (Ψ_3) corresponde a una regularización de Tikhonov¹⁵ que penaliza la falta de *suavidad* de cada perfil de concentración C_f y C_c . En este caso Ψ_3 aproxima numéricamente la norma al cuadrado de la derivada segunda de cada perfil, siendo mayor si el perfil posee rugosidades importantes.

LiRIC-CITEDEF realiza la minimización utilizando el procedimiento Trust Region Reflective¹⁶ (TRF) de la librería de optimización con restricciones de SciPy. La primera restricción impuesta es que los perfiles de concentración deben ser no negativos, y la segunda es que las relaciones de retrodispersión deben ser mayores o iguales a uno. Un valor de uno indica una ausencia de aerosoles en la altura de referencia especificada. Calculando analíticamente el gradiente de cada residuo con anterioridad, se evitó que el método deba aproximarlos y así se mejoró su performance.

V. ESTUDIO DE CASOS SINTÉTICOS

Tal como menciona la Introducción, programamos un *simulador atmosférico* en lenguaje Python para evaluar el funcionamiento del código presentado. Este simulador forma parte del código LiRIC-CITEDEF y devuelve todos los datos del lidar y del fotómetro solar necesarios para el procedimiento de inversión. El programa calcula una señal lidar media para las

tres longitudes de onda de los canales elásticos y simula el número de fotones recibidos empleando un modelo de Poisson.¹⁷ Para calcular esta señal recibe un perfil de concentración de partículas, su índice de refracción y radio para el modo fino y grueso. También calcula los valores que deberían obtenerse luego de analizar los datos obtenidos del fotómetro solar. Estos son: las concentraciones columnares totales V_f y V_c ; y los factores de extinción y retrodispersión modales promedio $a_j(\lambda_i)$ y $b_j(\lambda_i)$. Para todos estos cálculos el simulador emplea una librería¹⁸ que usa la teoría de Mie¹³ para calcular la extinción y retrodispersión. Los casos sintéticos nos permiten estudiar la eficiencia del algoritmo comparando concentraciones conocidas con calculadas. Se evaluó la calidad de la estimación utilizando el Root Mean Squared Error (RMSE), definida como:

$$RMSE(C, \hat{C}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2}. \quad (11)$$

El primer escenario consiste en un perfil de concentración simulado con dos capas separadas de aerosoles finos y gruesos sin agregado de ruido en la señal; el segundo suma al primero ruido Poissoniano; y el tercero superpone las capas, para evaluar si esto genera inconvenientes para la inversión.

VI. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación presentamos los casos de estudio simulando los modos fino (azul) y grueso (verde) de los aerosoles. Ambos modos tienen índices de refracción distintos. El modo fino representa sulfatos de radio efectivo igual $r_e = 0,4 \mu m$, un índice de refracción constante de $n = 1,35 + 0,002j$, y una densidad de $\rho = 1,6 g/cm^3$. El modo grueso considera parámetros de ceniza fina con radio efectivo de $r_e = 1,5 \mu m$, índice de refracción de $n = 1,5 + 0,01j$, y una densidad de $\rho = 2,6 g/cm^3$.^{10,19} En ambos casos la distribución de concentración de los aerosoles es *log-normal* con desviación estándar, σ , de valor 2. Cada gráfico muestra regiones sombreadas en verde y azul representando la barra de error continua de la determinación de concentración gruesa y fina respectivamente. Dichas barras se obtuvieron a través de una simulación Monte Carlo de un ensamble de 100 muestras con error aditivo gaussiano. La magnitud de ese error es similar al del caso real evaluado en este artículo.

$$\frac{\partial N}{\partial r} = \frac{N_o}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_o^r r^{-1} \exp\left(-\frac{(\ln r' - \ln r_m)^2}{2 \ln \sigma^2}\right) dr' \quad (12)$$

donde N_o es el número total de partículas por unidad de volumen, r los radios de las partículas y r_m radio del modo.

Escenario 1

La Figura 1 muestra dos perfiles de partículas (finas y gruesas) de baja concentración volumétrica,

hasta $25 \mu m^3/cm^3$, a diferentes alturas, (líneas sólidas) y los resultados obtenidos a partir del algoritmo LiRIC-CITEDEF (líneas punteadas). Para este caso simulamos señales lidar sin ruido. Se puede ver que el sistema recompone el perfil considerando una altura de referencia de $9 km$. El RMSE obtenido para el modo fino es de $0,18 \mu m^3/cm^3$ y de $0,075 \mu m^3/cm^3$ para el grueso.

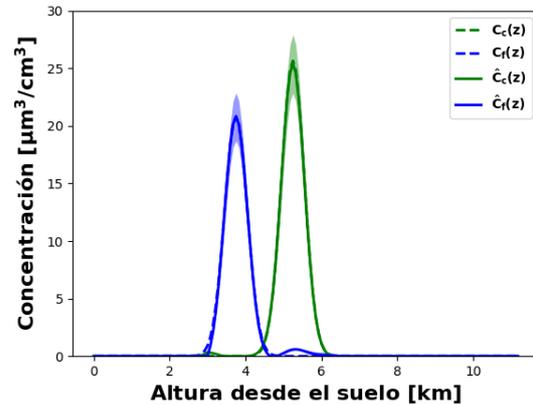


Figura 1: En líneas sólidas se observan los perfiles de concentración fino (azul) y grueso (verde) a diferentes alturas. Estos corresponden a los resultados obtenidos luego de la inversión, cuya altura de referencia se consideró a los $9 km$, una zona fuertemente molecular. Los gráficos en líneas punteadas corresponden a los perfiles de concentración vertical fino (azul) y grueso (verde) simulados. Los perfiles de concentración volumétricos se presentan en unidades de $\mu m^3/cm^3$ y la altura en km .

Escenario 2

Se consideran los mismos perfiles de concentración que en el Escenario 1. En este caso consideramos que la señal lidar presenta ruido Poissoniano de media igual a la intensidad de la señal recibida. La Figura 2 muestra tanto el modelo simulado como los resultados. El RMSE obtenido para el modo fino es de $0,52 \mu m^3/cm^3$ y de $0,50 \mu m^3/cm^3$ para el grueso.

Escenario 3

Dos perfiles de concentraciones (modo fino y modo grueso) superpuestas, con valores máximos entre $20 \mu m^3/cm^3$ y $25 \mu m^3/cm^3$, se muestran en la Figura 3. La altura de referencia z_{ref} fue considerada a los $9 km$, como en los escenarios anteriores y las señales lidar simuladas presentan ruido Poissoniano. El RMSE obtenido para el modo fino es de $0,78 \mu m^3/cm^3$ y de $0,33 \mu m^3/cm^3$ para el grueso.

Los resultados demuestran un buen desenvolvimiento del algoritmo, pudiendo reproducir los perfiles originales con bastante exactitud. La presencia de ruido en la señal lidar no aparenta ser un obstáculo mayor para el procedimiento, según las pruebas efectuadas. Es interesante ver cómo una correcta elección

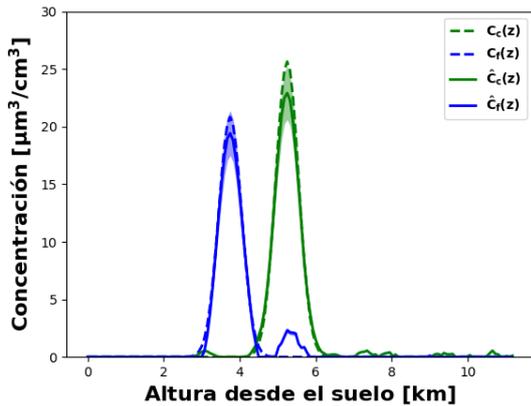


Figura 2: En líneas sólidas se observan los perfiles de concentración fino (azul) y grueso (verde) a diferentes alturas, obtenidos luego de la inversión. La altura de referencia se consideró a los 9 km, en una zona molecular. Los gráficos en líneas punteadas corresponden a los perfiles de concentración vertical fino (azul) y grueso (verde) simulados. Los perfiles de concentración volumétricos se presentan en unidades de $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ y la altura en km.

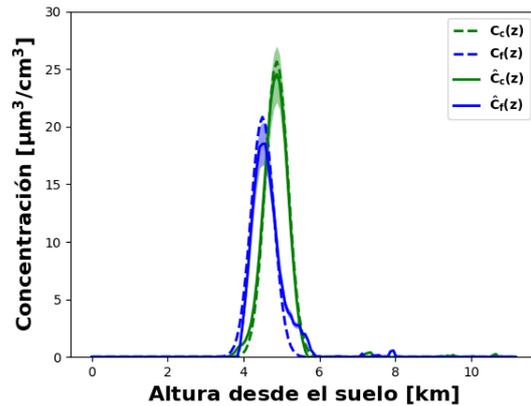


Figura 3: En líneas sólidas se observan los perfiles de concentración fino (azul) y grueso (verde) superpuestos, obtenidos luego de la inversión. La altura de referencia se consideró a los 9 km. Los gráficos en líneas punteadas corresponden a los perfiles de concentración vertical fino (azul) y grueso (verde) simulados. Los perfiles de concentración volumétricos se presentan en unidades de $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ y la altura en km.

de la altura de referencia, es decir, en una zona netamente molecular, mejora la predicción. De todas formas, el algoritmo es capaz de adaptarse ante errores de determinación de altura de referencia mediante la relación de retrodispersión R. La mezcla de modos no parece ser un problema particular para el algoritmo, como así tampoco el hecho de que las partículas puedan responder a distintos índices de refracción.

Caso de estudio real

Ilustraremos el uso de la herramienta en un caso concreto, tomando como base un evento de quema de biomasa ocurrido el día 19 de Agosto del 2014 medido en la estación de monitoreo de Villa Martelli con dos instrumentos, un lidar y un fotómetro solar, este último perteneciente a la red AERONET. En la Figura 4 se puede observar la medición del sistema Lidar correspondiente al canal de 1064 nm, donde se muestra la retrodispersión de la señal Lidar en escala logarítmica con unidades arbitrarias.

Se ensayó el proceso de inversión LiRIC-CITEDEF en dos franjas de tiempo, tomando un promedio temporal de 15 minutos de señales a fin de mejorar la relación señal-ruido y se llevó a cabo el procedimiento. Mostramos a modo de ejemplo el resultado obtenido en la Figura 4 entre las 12 : 30 UTC a 12 : 40 UTC, habiéndose detectado la presencia de aerosoles de mayor tamaño en los primeros 500 m de forma predominante y en menor proporción la presencia de aerosoles de menor tamaño (modo fino), los cuales se presentan hasta los 1500 m, algo que resulta consistente con el resultado del gráfico de retrodispersión.

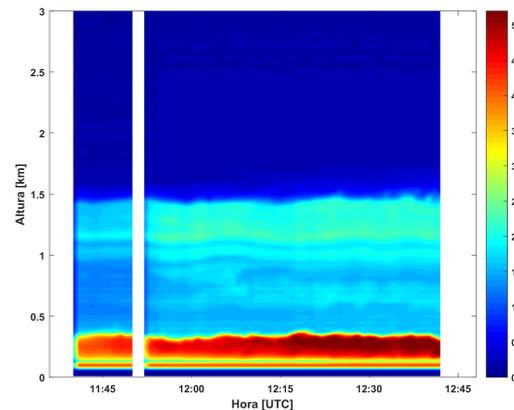


Figura 4: Señal lidar de retrodispersión de aerosoles corregida en rango para el canal de 1064 nm medida el 19 de Agosto de 2014 en la estación de monitoreo de Villa Martelli. La franja en blanco corresponde a la ausencia de medición lidar.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El sistema LiRIC-CITEDEF ha demostrado ofrecer buenos resultados en el caso de estudios de escenarios sintéticos. Si bien el mismo es bastante específico en cuanto a sus hipótesis, los ensayos han demostrado robustez del procedimiento frente al alejamiento de las mismas. Cabe aclarar que la ejecución de estas pruebas se vio notablemente simplificada con la versión reimplementada, ya que en su forma original el LiRIC es de costosa ejecución, requiriendo bastante intervención por parte del operario, y presenta la necesidad de emplear productos comerciales para la ejecución del mismo. Además, se llevó a cabo un procedimiento de simulación atmosférica para poder con-

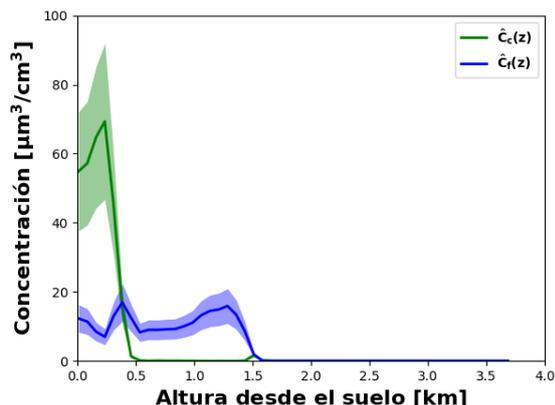


Figura 5: Estimación de particulado fino (azul) y grueso (verde) correspondiente al evento del 19 de Agosto de 2014 en Villa Martelli, en la franja horaria de 12:30 hs a 12:40 hs. La unidades de la concentración se encuentran en $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ y la altura en km.

trastar la herramienta LiRIC en casos sintéticos. En el estudio de un escenario real de un evento de quema de biomasa los resultados del LiRIC-CITEDEF fueron promisorios. Éstos son consistentes con lo analizado en el gráfico de la señal lidar, representando el primer ensayo, hasta donde los autores tienen conocimiento, de la implementación y puesta en práctica de un algoritmo de determinación de concentración para un escenario en territorio Argentino. Como futuro trabajo, se espera continuar con la adaptación del LiRIC-CITEDEF para incorporar información de depolarización. En consecuencia, se podrá proveer información vinculada a la forma de la partícula, lo cual es útil para los estudios de tipificación de partículas. Por otro lado, quedará pendiente para trabajos futuros el análisis de otros procedimientos similares existentes, como el GARRLiC/GRASP,²⁰ POLIPHON²¹ y el SKYLIDAR.²²

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF), lugar en donde se desarrollaron estos estudios, a la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), por financiar parte de estas investigaciones, al Dr. Anatoli Tchaicovski por su contribución de material bibliográfico a los fines de realizar este trabajo, al proyecto de colaboración franco argentina ECOS y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por su apoyo en esta actividad.

Bibliografía

1. L. Ana Otero, P. R. Ristori, J. V. Pallotta, E. E. Pawelko, and E. J. Quel, "The puyehue-cordón caulle volcanic eruption, june 2011: Water vapor, atmospheric boundary layer and aerosol tempo-

ral evolution in buenos aires, argentina," *Revista Boliviana de Física*, vol. 21, no. 21, pp. 27–29, 2012.

2. L. A. Otero, P. R. Ristori, J. V. Pallotta, E. E. Pawelko, P. A. Ballesteros, F. Orte, G. Nicora, M. M. Raponi, R. D'Elia, E. Wolfram, J. Salvador, D. Bulnes, E. Martorella, A. Pereyra, F. González, O. Vilar, J. C. Dworniczak, and E. J. Quel, "Medición de cenizas del volcán puyehue - cordón caulle con un sistema lidar en buenos aires, argentina, durante junio 2011," *Anales AFA, ISSN: 0327-358 X ISSN (Online) 1850 - 1158*, vol. 23, pp. 148–152, 2012.
3. L. A. Otero, P. R. Ristori, S. Papandrea, J. Pallotta, F. González, C. Repetto, E. Martorella, A. Pereyra, O. Vilar, V. Dworniczak, R. D'Elia, M. Ferrari, F. Jeric, C. Pacheco, M. Proyetti, and E. J. Quel, "Detección de cenizas volcánicas procedentes del volcán calbuco en la estación de monitoreo atmosférico en aeroparque, buenos aires, abril 2015," *II Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Ambiental. II Congreso Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires Intendente Güiraldes 2160 Pabellón II Ciudad Universitaria Buenos Aires, Argentina Buenos Aires , 1 al 4 de diciembre de 2015. Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental. Argentina y Ambiente 2015 Libro de Resúmenes*, p. 76, 2015.
4. J. D. Klett, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns," *Applied optics*, vol. 20, no. 2, pp. 211–220, 1981.
5. J. D. Klett, "Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios," *Applied Optics*, vol. 24, no. 11, pp. 1638–1643, 1985.
6. F. G. Fernald, "Analysis of atmospheric lidar observations: some comments," *Applied optics*, vol. 23, no. 5, pp. 652–653, 1984.
7. Y. Sasano, E. V. Browell, and S. Ismail, "Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution," *Applied Optics*, vol. 24, no. 22, pp. 3929–3932, 1985.
8. O. Dubovik and M. D. King, "A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 105, no. D16, pp. 20673–20696, 2000.
9. A. Chaikovsky, O. Dubovik, P. Goloub, N. Balashevich, A. Lopatsin, Y. Karol, S. Denisov, and T. Lapyonok, "Software package for the retrieval of aerosol microphysical properties in the vertical column using combined lidar/photometer data (test version)," tech. rep., Tech. rep., Institute

- of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 2008.
10. J. Wagner, A. Ansmann, U. Wandinger, P. Seifert, A. Schwarz, M. Tesche, A. Chaikovsky, and O. Dubovik, "Evaluation of the lidar/radiometer inversion code (liric) to determine microphysical properties of volcanic and desert dust," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, no. 7, pp. 1707–1724, 2013.
 11. U. Wandinger and A. Ansmann, "Experimental determination of the lidar overlap profile with raman lidar," *Applied Optics*, vol. 41, no. 3, pp. 511–514, 2002.
 12. O. Dubovik, A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Munoz, B. Veihelmann, *et al.*, "Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 111, no. D11, 2006.
 13. C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008.
 14. A. Chaikovsky, O. Dubovik, B. Holben, A. Bril, P. Goloub, D. Tanré, G. Pappalardo, U. Wandinger, L. Chaikovskaya, S. Denisov, *et al.*, "Lidar-radiometer inversion code (liric) for the retrieval of vertical aerosol properties from combined lidar/radiometer data: development and distribution in earlinet," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 9, no. 3, pp. 1181–1205, 2016.
 15. S. Twomey, *Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurements*, vol. 3. Elsevier, 2013.
 16. A. Conn, N. Gould, and P. Toint, *Trust Region Methods*. MPS-SIAM Series on Optimization, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
 17. B. Oliver, "Thermal and quantum noise," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 5, pp. 436–454, 1965.
 18. J. Leinonen, "Python code for calculating mie scattering from single-and dual-layered spheres," 2013.
 19. A. Ansmann, D. Müller, U. Wandinger, and R. Mamouri, "Lidar profiling of aerosol optical and microphysical properties from space: overview, review, and outlook," in *First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment. International Society for Optics and Photonics*, p. 879502, 2013.
 20. A. Lopatin, *Enhanced remote sensing of atmospheric aerosol by joint inversion of active and passive remote sensing observations*. PhD thesis, Lille 1, 2013.
 21. R. Mamouri and A. Ansmann, "Fine and coarse dust separation with polarization lidar," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 7, no. 11, pp. 3717–3735, 2014.
 22. R. Kudo, T. Nishizawa, and T. Aoyagi, "Vertical profiles of aerosol optical properties and the solar heating rate estimated by combining sky radiometer and lidar measurements," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 9, no. 7, pp. 3223–3243, 2016.