# Apéndice H. Medición de Altura de Capa de Mezcla

## Adenda Estudio de Impacto Ambiental “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

### Codelco Chile

Elaborado por:

**Gestión Ambiental SpA, operating under the trade name SLR Chile**

Edificio Titanium La Portada, piso 27, Isidora Goyenechea 2800,
7550647 Las Condes, Región Metropolitana, Chile

15-11-2026

Revisión: VF




# Medición de la altura de capa de mezcla con un nefobasímetro y su estimación en los modelos atmosféricos en Calama y sus áreas circundantes

25 DE AGOSTO DE 2025

# 1 Introducción

La altura de la capa límite planetaria (PBLH, por sus siglas en inglés *Planetary Boundary Layer Height*), también conocida como capa de mezcla, es una variable fundamental para estudios de calidad del aire. Su valor define el volumen de atmósfera en el que se diluyen los contaminantes. Una PBLH más alta implica un mayor volumen disponible para la mezcla, y por lo tanto, una menor concentración de contaminantes como el material particulado (PM).

Existen diversas metodologías para estimar la PBLH, entre las cuales destacan:

i) radiosondeos, que permiten detectar la inversión térmica;
ii) perfiladores acústicos de temperatura como los sistemas SODAR-RASS; y
iii) tecnologías LIDAR, como el uso de nefobasímetros (*ceilometers*), que detectan la presencia de aerosoles en altura.

En el presente análisis, se usan datos de mediciones con un nefobasímetro VAISALA CL31, un equipo ampliamente utilizado en estudios de calidad del aire tanto en Chile como a nivel internacional. Las mediciones se realizaron en modo campaña durante un período de más de un año. En estudios previos como los de Muñoz y Alcafuz (2012) y Muñoz *et al.* (2025), se ha utilizado esta tecnología para caracterizar la capa límite en áreas urbanas, como Santiago. Por otro lado, Flores *et al.* (2020) documentan el uso de nefobasímetros móviles para estudiar la distribución de aerosoles (polvo) en el desierto de Atacama. Estos antecedentes respaldan la pertinencia de utilizar esta tecnología en el presente estudio.

# 2 Descripción campaña de prueba

CODELCO llevó a cabo una campaña de mediciones con un nefobasímetro desde el 20 de abril de 2023 hasta el 21 de agosto de 2024. El equipo fue instalado en la estación Chusubmetal (22°24'27"S, 68°54'32"W; 2.320 m.s.n.m.), ubicada aproximadamente a 5 km al norte de Calama y 2 km al sur de la División Ministro Hales (DMH) de CODELCO. El nefobasímetro operó de forma continua (24/7) durante todo el período de medición. En la Figura 1, se presenta una fotografía del

equipo instalado en la estación Chusubmetal y en la Figura 2 se presenta un mapa de la ubicación de la estación Chusubmetal.



*Figura 1: Foto de instalación de equipo nefobasímetro Vaisala CL31 en la estación Chusubmetal de CODELCO.*

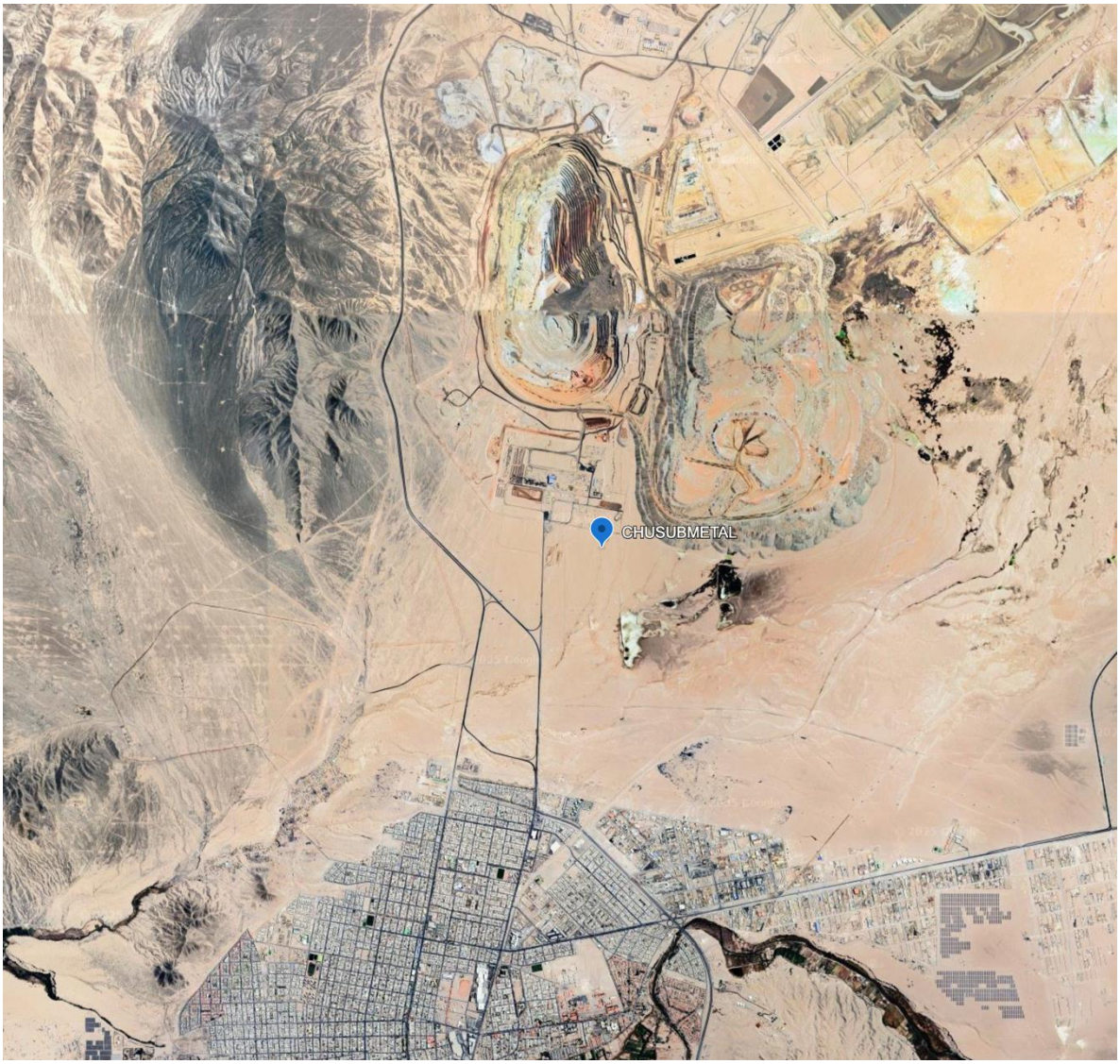



*Figura 2: Mapa de referencia de ubicación Chusubmetal, en el contexto de la cuidad de Calama.*

# 3 Metodología y Datos

Durante la campaña se registraron 484 días de datos válidos. El parámetro analizado fue la retrodispersión (backscatter), el cual refleja la presencia de aerosoles en la atmósfera. El análisis se centró en el período nocturno, entre las 20:00 y las 08:00 horas, considerando sólo los primeros 500 metros sobre la superficie. Hay dos razones para evaluar sólo el horario nocturno:
a) Es durante el periodo nocturno que se observa un flujo de masas del aire que podrían llevar las emisiones de material particulado de Codelco hacia Calama, y
b) Durante el periodo diurno no se detectaba suficiente material particulado en aire para que el nefobasímetro generara una señal clara. La baja carga durante el día posiblemente se debe a una mayor PBLH y/o a que no hay fuentes cercanas viento abajo del nefobasímetro con emisiones suficientes para generar una señal. Incluso durante la noche, pueden existir horas con insuficiente material particulado para que el nefobasímetro entregue una señal clara, tal como también se muestra en el ejemplo de la Figura 3.

La estimación de la PBLH se realizó mediante un algoritmo de gradiente simplificado descrito, entre otras, por *Caicedo et. al.,* 2017, y que examina perfil por perfil (cada 9 segundos) y detecta hasta qué altura se observan aerosoles. Esta altura se "interpreta" como el tope de la capa de mezcla. Para aplicar este método es necesario que haya una señal clara de aerosoles; en consecuencia, los períodos atmosféricos "limpios" (sin presencia de aerosoles) fueron descartados.

Con el fin de obtener un valor representativo diario, se estableció un criterio de al menos 60% de disponibilidad de datos válidos por hora de PBLH entre las 20:00 y las 08:00 horas. Los días que no cumplieron con este umbral fueron excluidos del análisis.(Cabe señalar que no existe un criterio objetivo para obtener un valor "representativo". No obstante, según la experiencia en los trabajos indicados en las referencias de este documento, un 60% es un corte razonable.) Así, se obtuvo un valor diario promedio de PBLH para cada jornada considerada.

En la "interpretación" de los datos, se debe considerar los siguientes tres puntos:

1) Para una mezcla de un contaminante en toda la columna de la capa de mezcla, se requiere un cierto tiempo. Las emisiones cerca de la medición con un nefobasímetro no necesariamente se han mezclado bien, por lo que los datos puedan sub-estimar la PBLH de mezcla en estos casos.
2) Las mediciones con el nefobasímetro tienen una frecuencia de 9 segundos. Existen casos en los que se observa una variabilidad fuerte en la estimación de la PBLH por el algoritmo. Ese fenómeno, en general, se observa con una carga baja de material particulado y con la que el algoritmo no necesariamente puede detectar bien el gradiente de concentraciones que debería definir la PBLH.

3) Existen casos en los que el nefobasímetro observa una carga baja de material particulado algo despegada en altura y en los que el algoritmo no encuentra un gradiente muy definido. En estos casos, el algoritmo puede ubicar la PBLH muy cerca de la superficie.

En la Figura 3, se muestra un ejemplo típico de la señal del nefobasímetro para el caso de la noche entre el 3 y 4 de junio 2024 (entre las 20:00 – 08:00). Los colores indican el retrodispersión (*backscatter*, BS) del nefobasímetro y los puntos blancos la estimación del algoritmo de la altura de la capa de mezcla. En general, la señal del nefobasímetro permite una buena identificación de un gradiente en las concentraciones y, por lo tanto, de la PBLH. Se observa también una variabilidad importante en la altura de la capa de mezcla; aun así se observan dos periodos (entre las 20:00-20:30 y las 21:00-22.00) en el que la carga de material particulado es tan bajo (y más bien en altura) que el algoritmo no identifica bien un gradiente.

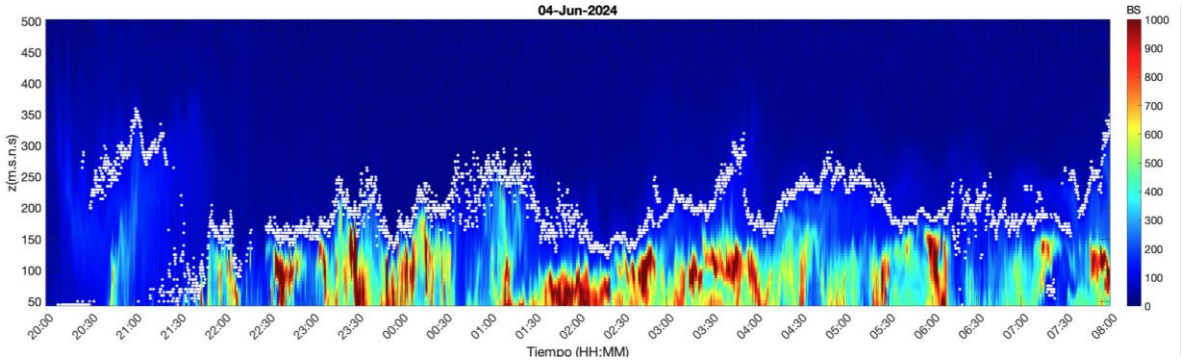



*Figura 3:. Ejemplo típico de la señal del nefobasímetro para el caso de la noche entre el 3 y 4 de junio 2024 (entre las 20:00 – 08:00). Los colores indican el retrodispersión (*backscatter, *BS) del nefobasímetro y los puntos blancos la estimación del algoritmo de la PBLH.*

En la Figura 4, se muestra un ejemplo de un periodo de medición entre el 21 y 22 de julio 2024 (entre las 20:00 – 08:00) con los tres problemas anteriormente mencionados y los que se pueden observar con las mediciones con un nefobasímetro para la estimación de la PBLH. En la figura, se indican con las letras esos problemas según:

a) Periodo con muy baja carga de material particulado. Durante este periodo, no existe información suficiente para una estimación de la PBLH. Esta situación es típica durante el día con flujos desde Calama hacia Codelco, pero también se pueden observar a veces durante la noche.
b) Carga muy baja de material particulado y en altura. El algoritmo ubica la PBLH erróneamente cerca de la superficie.
c) Una carga más bien baja de material particulado y un gradiente poco definido. En situaciones así, el algoritmo puede indicar una muy alta variabilidad de la PBLH. Esta alta variabilidad se debe asociar al algoritmo más que a un fenómeno físico.

Los problemas indicados son intrínsecos de los métodos de medición y del algoritmo. Mientras no se observan siempre, se deben considerar en el uso de los datos. Usando promedios de los datos, en vez de considerar mediciones instantáneas, ayuda en obtener resultados físicamente razonables. (Debido al tipo de problema indicado en el punto b), es posible que los promedios puedan indicar una altura de capa de mezcla algo inferior de la real.)

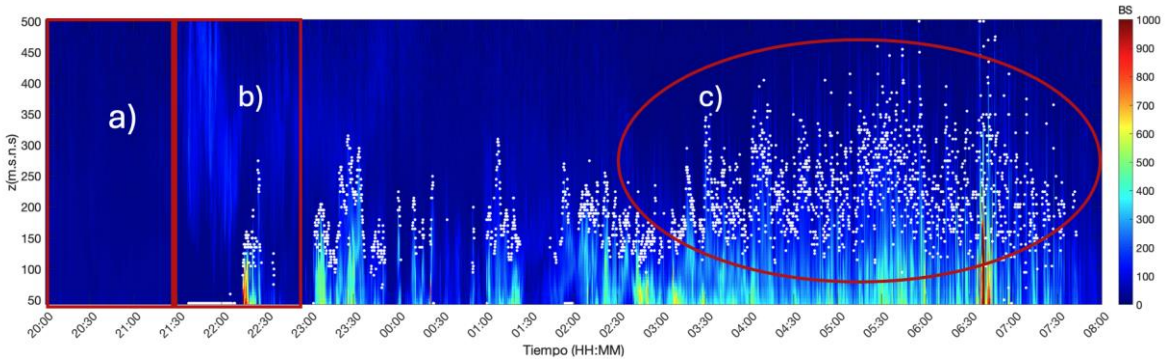
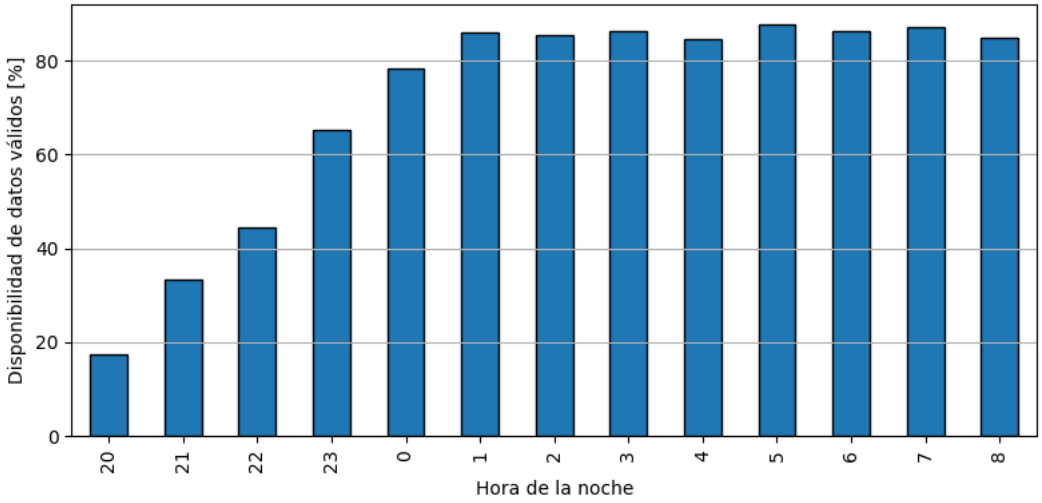



*Figura 4:. Ejemplo de la señal del nefobasímetro para el caso de la noche entre el 21 y 22 de julio 2024 (entre las 20:00 – 08:00), indicando tres problemas que se pueden observar a veces con las mediciones con un nefobasímetro para la estimación de la PBLH: a) falta de información para la estimación de la PBLH, b) carga muy baja y en altura de material particulado y c)alta variabilidad en la estimación de la PBLH.*

# 4 Resultados de las mediciones

De los 484 días de mediciones, no siempre se encontraba suficiente carga de material particulado en la atmósfera para poder estimar la PBLH. En la Figura 5, se muestra la disponibilidad de días (en %) en las que se podía estimar la PBLH según la hora de la noche. Se puede observar que entre las 00:00 y las 08:00 la disponibilidad de datos válidos es alrededor de 80%. La menor disponibilidad de datos entre las 20:00 y 23:00 se debe a que no necesariamente se ha establecido un transporte de material particulado desde las fuentes hacia el nefobasímetro, o sea, que ese horario todavía es parte de la fase de transición vespertina.




Tal como indicado en la sección anterior, se consideran los promedios (en este caso, promedios diarios) para la altura de la capa de mezcla (en la sección siguiente, se puede observar que la altura de capa de mezcla no varía mucho entre las 00:00– 08:00 y las 20:00-23:00 por lo que se considera válido promediar a lo largo de esos horarios). En la Figura 6, se presenta la serie de tiempo de la altura de la capa de mezcla a lo largo de toda la campaña. Se observa una variabilidad a lo largo del periodo de la campaña, pero, en general, la PBLH nocturna entre las 20:00-08:00 se encuentra confinada entre aproximadamente 150 y 250 metros. Su promedio durante toda la campaña es de 202 metros.

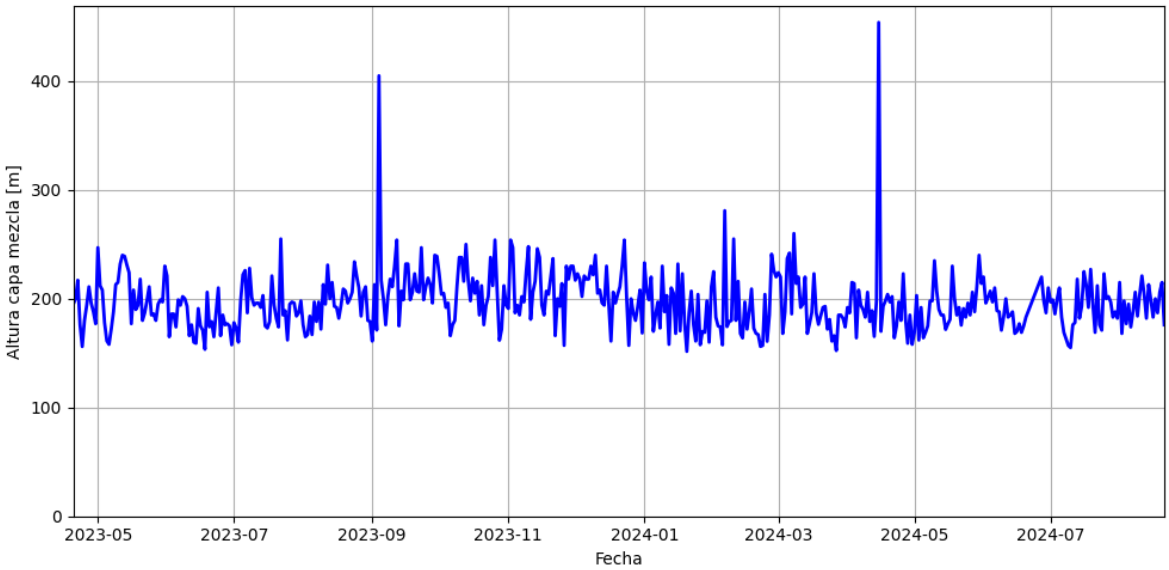



*Figura 5: Serie de tiempo de la altura de la capa de mezcla a lo largo de la campaña.*

# 5 Comparación de la PBLH medida y modelada

Una variable importante en la simulación de dispersión de contaminantes es justamente la PBLH. En términos simplificados, una PBLH baja, genera, bajo el mismo escenario de emisiones, concentraciones mayores y una PBLH alta ayuda a disminuir las concentraciones.

La "Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA" del SEA recomienda el uso del modelo WRF para la generación de la información meteorológica usada en el modelo de dispersión CALPUFF. Para poder ingresar esos datos WRF en CALPUFF, se usa el pre-procesador meteorológico Mesoscale Model Interface Program (MMIF). MMIF interpola algunas variables meteorológicas a la grilla de CALPUFF (como, por ejemplo, la velocidad y la dirección de viento) y deriva otras desde la información entregada por WRF. Una de esas variables derivadas es justamente la PBLH.

Usando la información de la PBLH de los datos WRF del 2024 (y derivadas por MMIF), se puede calcular un ciclo diario promedio. En la Figura 6, se muestra el siglo diario de la capa de mezcla en el punto en el dominio equivalente a la ubicación del nefobasímetro (línea naranja). Se puede observar un comportamiento de la PBLH físicamente razonable, con una PBLH deprimida durante la noche y elevada durante el día. También se muestra en la Figura 6 la PBLH entre las 20:00 – 08:00 medida con el nefobasímetro. (Cabe recordar que no hay información suficiente durante el día para poder estimar la PBLH en base a datos del nefobasímetro.) En este caso, y similar a lo simulado por WRF, se puede observar una PBLH deprimida durante la noche. No obstante, la comparación entre la PBLH simulada y la medida muestra que la modelada tiene un poco menos que un tercio de la altura de capa de mezcla medida; en promedio y durante los periodos entre las 20:00-08:00 la PBLH simulada es de 60 metros **y la medida de 202 metros**.

Considerando lo indicado anteriormente que una PBLH baja, genera, bajo el mismo escenario de emisiones, concentraciones mayores y una capa de mezcla alta ayuda a disminuir las concentraciones, se debe concluir que la altura de capa de mezcla simulada y mucho más baja de la observada genera una sobre-estimación en las concentraciones simuladas.

Cabe señalar que no existe una manera, de corregir la PBLH que MMIF le entrega al modelo CALPUFF explícitamente. No obstante, en la configuración de CALPUFF, se puede indicar un mínimo de la PBLH que CALPUFF debe considerar (XMINZI). En este contexto, **se debe usar un valor de 150 (metros) para este parámetro**. El ciclo diario resultante de la PBLH usada en CALPUFF se muestra en la Figura 7. Se puede observar que la PBLH nocturna sigue siendo menor en la simulación (por un 15%); de esta manera se asegura se asegura una estimación conservadora de concentraciones en la simulación.

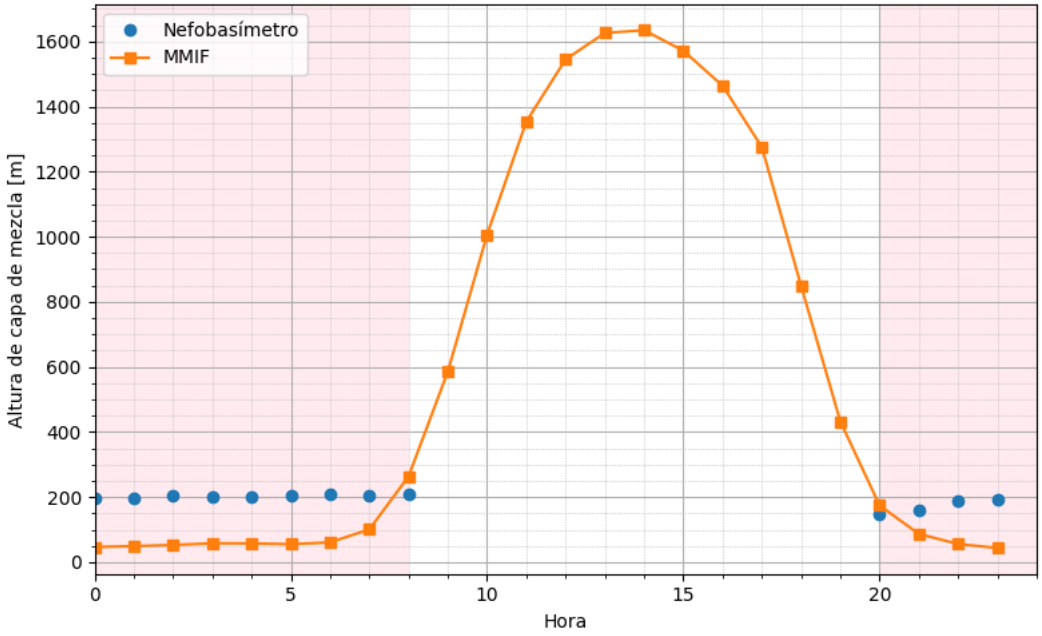



*Figura 6: Siglo diario PBLH en el punto en el dominio equivalente a la ubicación del nefobasímetro según los datos simulados (línea naranja) y medidos (puntos azules).*

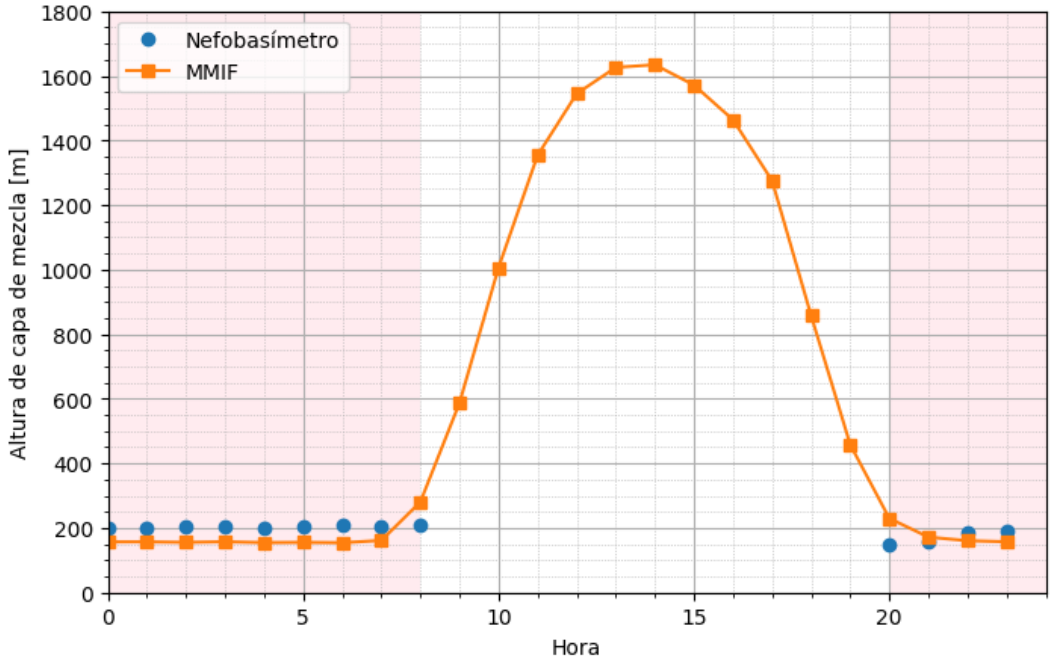



*Figura 7: Siglo diario PBLH en el punto en el dominio equivalente a la ubicación del nefobasímetro según los datos usados y XMINZI = 150 en la configuración de CALPUFF (línea naranja) y medidos (puntos azules).*

# 6 Referencias

Caicedo, V., B. Rappenglück, B. Lefer, G. Morris, D. Toledo, and R. Delgado, 2017: Comparison of aerosol lidar retrieval methods for boundary layer height detection using ceilometer aerosol backscatter data. Atmos. Meas. Tech., 10, 1609–1622, https://doi.org/10.5194/amt-10-1609-2017.

Flores, F., A. Arriagada, N. Donoso, A. Martínez, A. Viscarra, M. Falvey, and R. Schmitz, 2020: Investigation of a Nocturnal Cold-Air Pool in a Semiclosed Basin Located in the Atacama Desert. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **59**, 1953970, https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0237.1.

Muñoz, R. C., R. Schmitz, R. Alcafuz, N. Huneeus, C. Alzola, A. Arriagada, A. Martínez, 2025: Non-local factors of the convective boundary layer and its evening transition observed with fixed and mobile ceilometers in the Santiago valley. Accepted in *J. Applied Meteorology and Climatology*.

Muñoz, R.C., Alcafuz, R., 2012: Variability of urban aerosols over Santiago, Chile: comparison of surface PM10 concentrations and remote sensing with ceilometer and lidar. *Aerosol and Air Quality Research*, **12,** 8-19, doi: https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.08.0133