

Uso del ceilómetro para entender la dispersión y transporte del material particulado en la Región Paso del Norte

Ing. Adrián Peña Navarrete

Dr. Felipe Adrián Vázquez Gálvez

M.C. Yazmin Guadalupe Hernández García

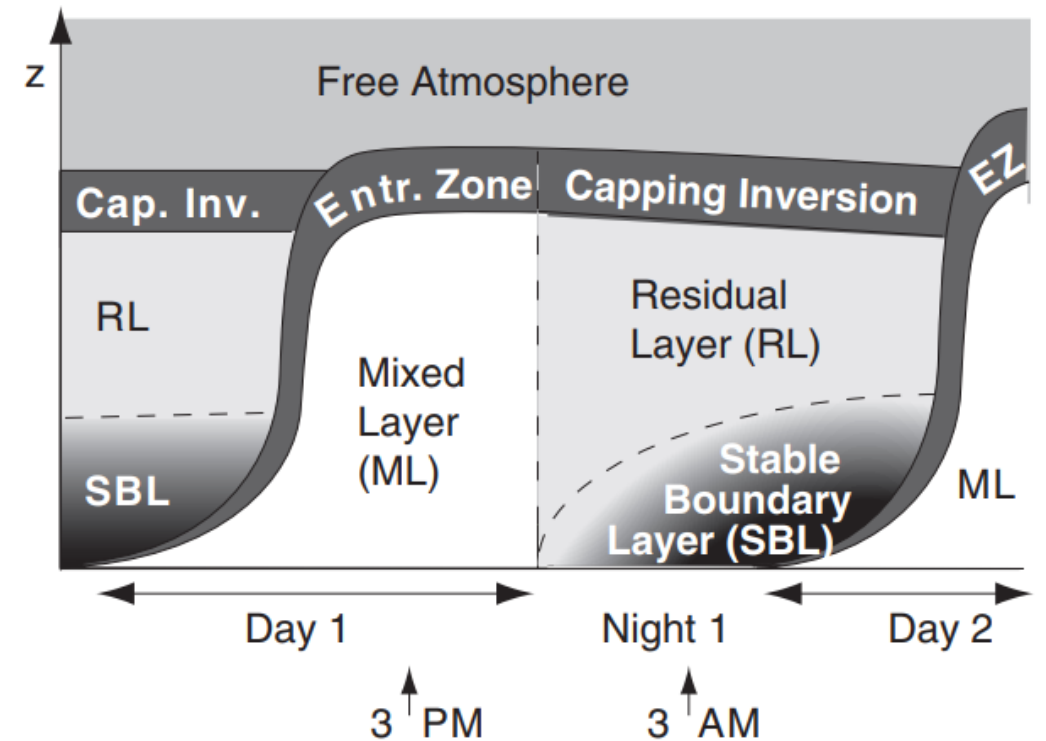
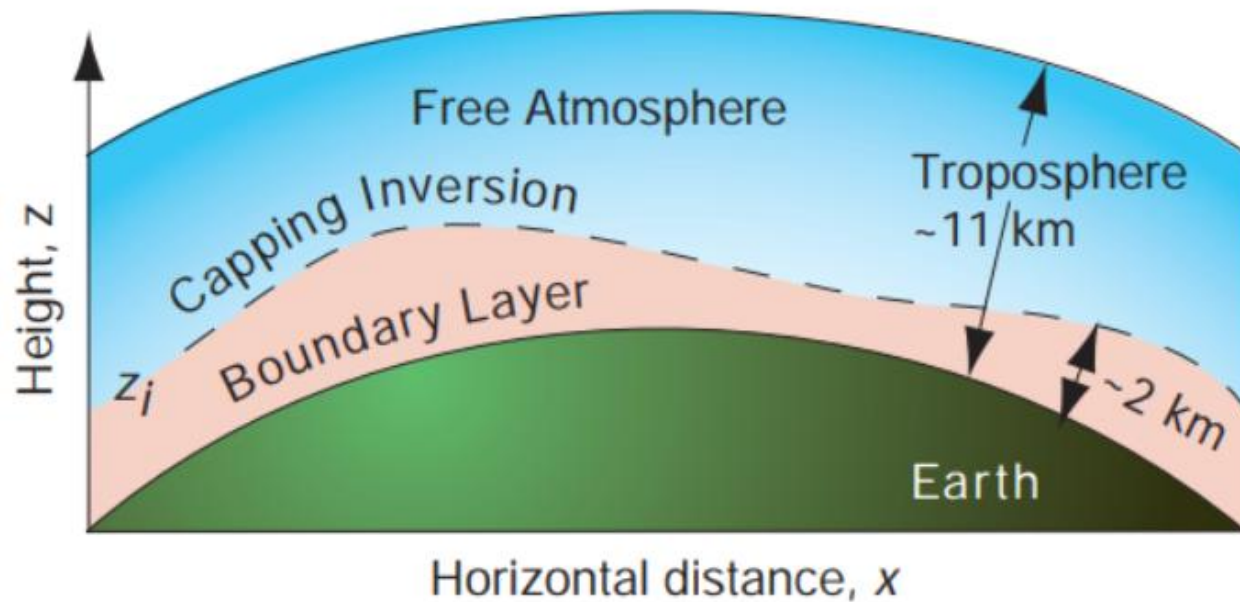
Centro de Ciencias Atmosféricas y Tecnologías Verdes (CECATEV)

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez



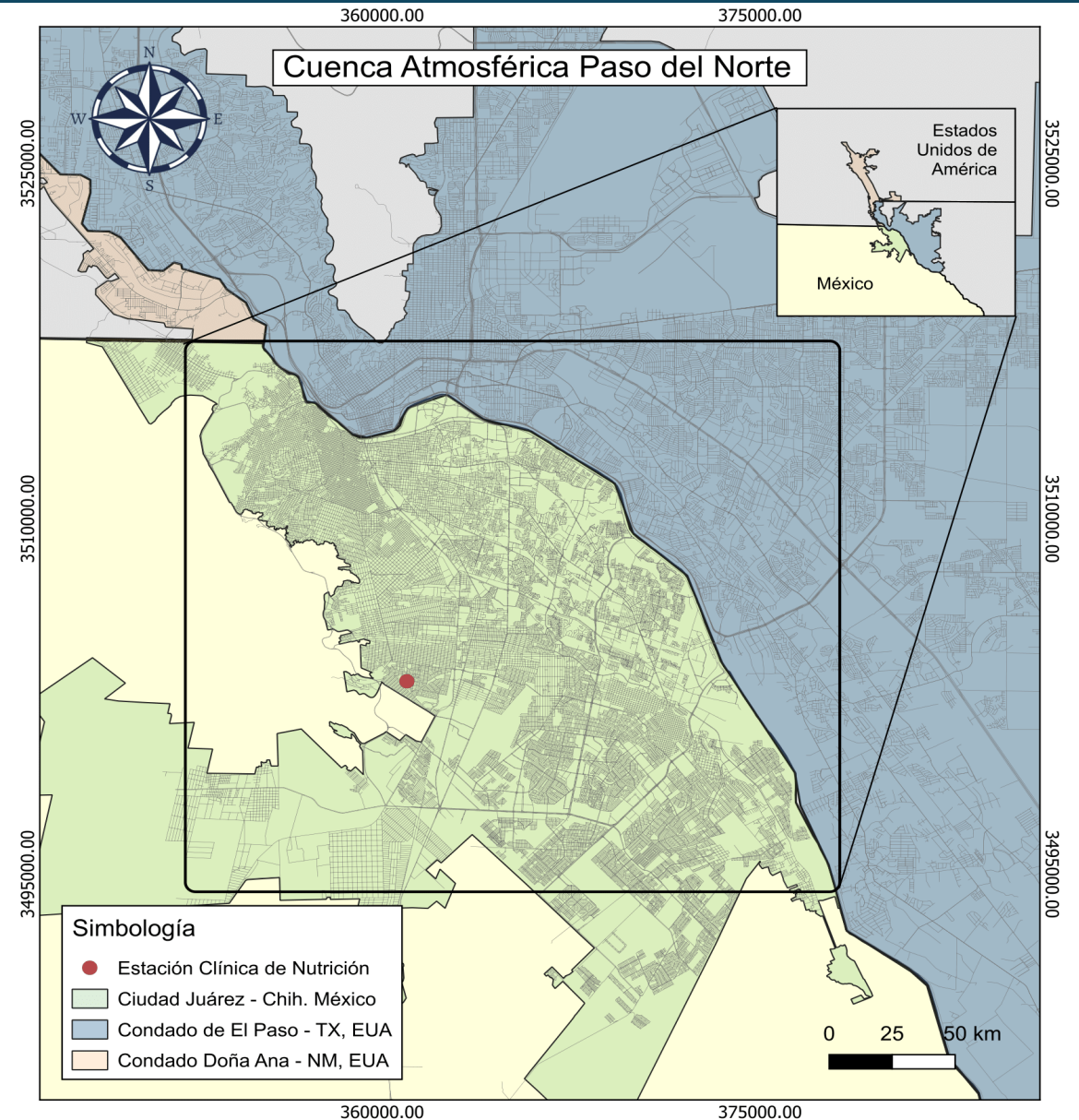
Capa Límite Planetaria (CLP)

- Es la región ubicada en la **parte más baja de la troposfera** altamente sensible a los efectos de la superficie terrestre (*R. Stull, 2011*).
- La altura de la CLP no es constante con el tiempo y depende de la relación existente entre el aire y la superficie de la tierra (*Wallace y Hobbs, 2006*).



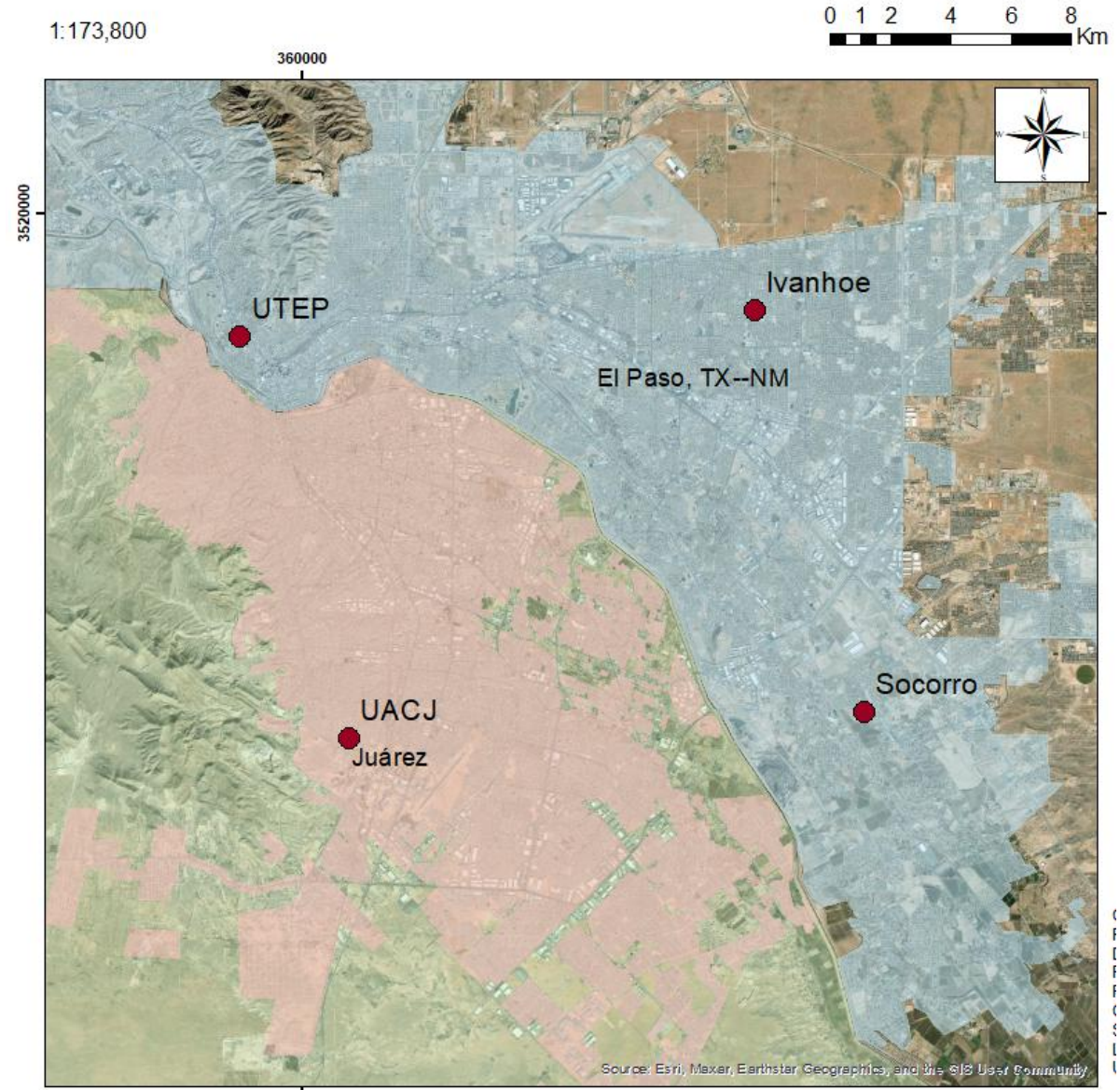
Contexto regional

- Región **binacional** con alta actividad industrial y crecimiento urbano
- Condiciones meteorológicas extremas
- Eventos de **clima severo** (tolvaneras y ondas de calor)
- Concentraciones de PM son un problema persistente
- **Estación Clínica de Nutrición** (cercana a un cambio de terreno, calles sin pavimentar y sin vegetación)



Importancia del ceilómetro

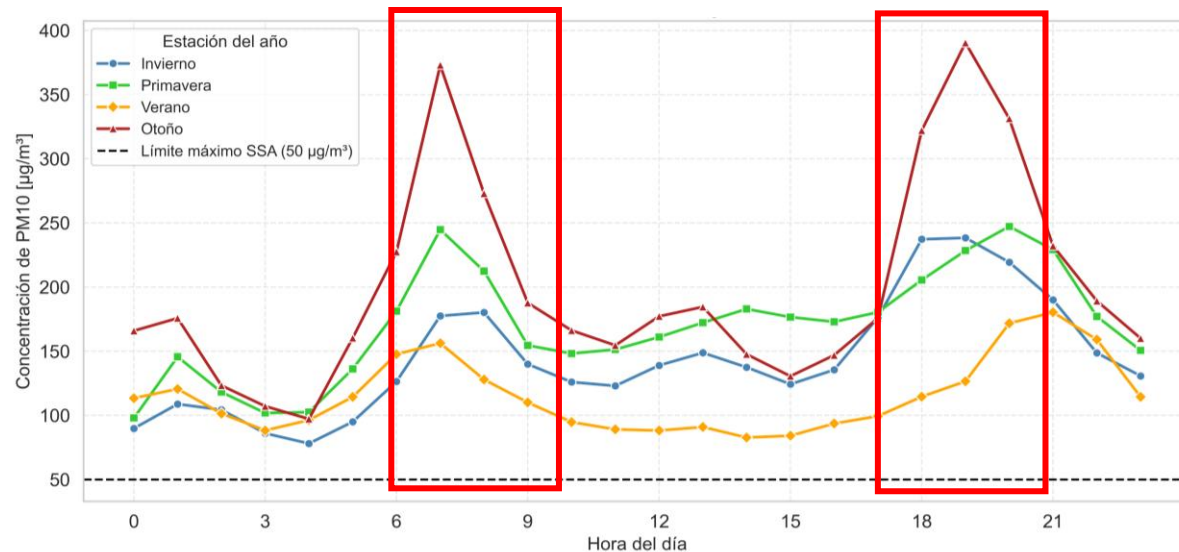
- Es un **sensor LIDAR** que mide la intensidad de la luz retrodispersada
- Permite un **monitoreo vertical continuo**
- Genera un **perfil de retrodispersión** de la atmósfera hasta 4 km
- Detección de CLP, **capas residuales** y **transporte vertical**
- Complementario a **estaciones de superficie** y **modelos numéricos**



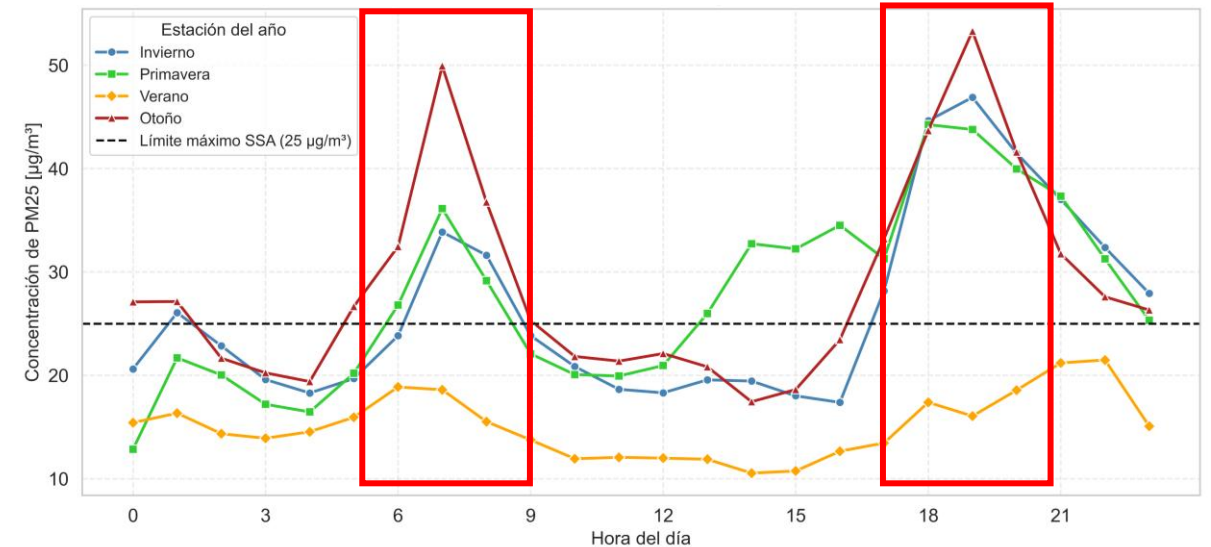
Material particulado

- Los niveles de concentración promedio en Clínica de Nutrición de material particulado se encuentran por encima de los límites establecidos por la **NOM-025-SSA1-2021**

Concentración promedio de PM10



Concentración promedio PM2.5



Gráficas generadas para tener una visualización de la información, no son de uso normativo

Enfoque y objetivo del estudio

- Evaluar el **comportamiento de la capa límite planetaria (CLP)** en una zona urbana con **niveles elevados** de material particulado
 - Construir una **climatología de retrodispersión** medida por un ceilómetro
 - Implementar un **filtrado** para la eliminación de nubes y eventos de precipitación
 - **Determinar la altura de la CLP** mediante un algoritmo combinado
 - Identificar episodios característicos de **transporte vertical o formación de capas de aerosoles** mediante el análisis conjunto de perfiles de retrodispersión, temperatura y viento.

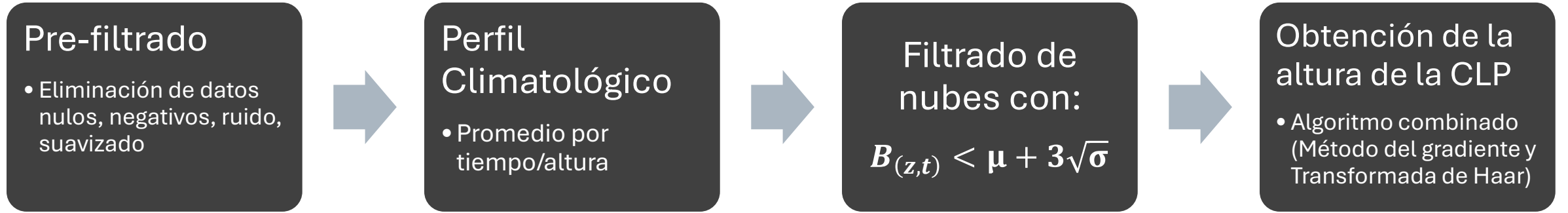
Estación Clínica de Nutrición: punto crítico

- Localizada al **sur de Ciudad Juárez**, entorno complicado (**calles sin pavimentar y alto flujo industrial**)
- Se considera un **punto crítico** de contaminación por PM, como se evidenció en la gráfica previa de concentraciones horarias
- Permite relacionar la **evolución de la CLP** con niveles elevados de concentración y evaluar las mediciones realizadas por el **ceilómetro en entornos complicados**

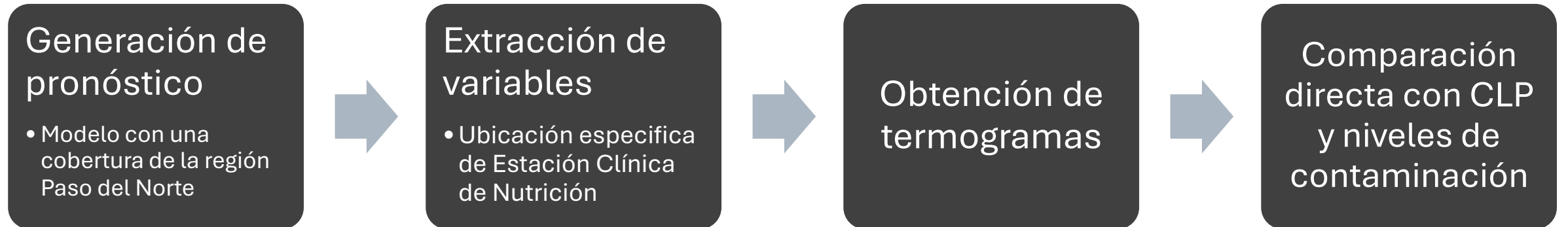
Instrumentación empleada en la investigación:			
Variable	Instrumento/Fuente	Resolución temporal	Periodo analizado
Retrodispersión	Ceilómetro Vaisala CL31	10-30 segundos	06/2023 - 09/2025
Concentración promedio de PM	Teledyne API Modelo T640	1 hora	01/2024 – 05/2025
WRF	Dominio Cuenca Paso del Norte	1 hora	10/2024 - 09/2025

Procesamiento de datos y metodología

Procesamiento del perfil de retrodispersión *(Garcia-Franco, et all. 2018)*



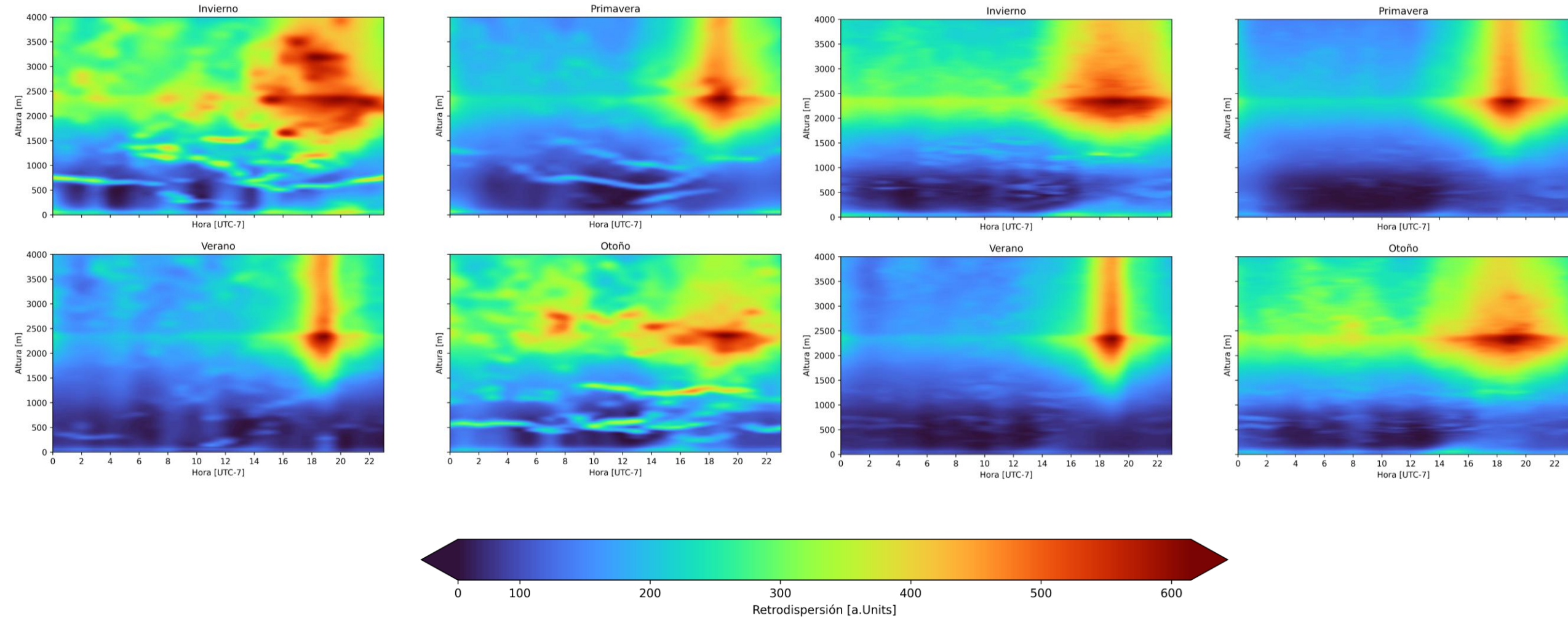
Procesamiento de valores calculados por WRF



Climatología del perfil de retrodispersión

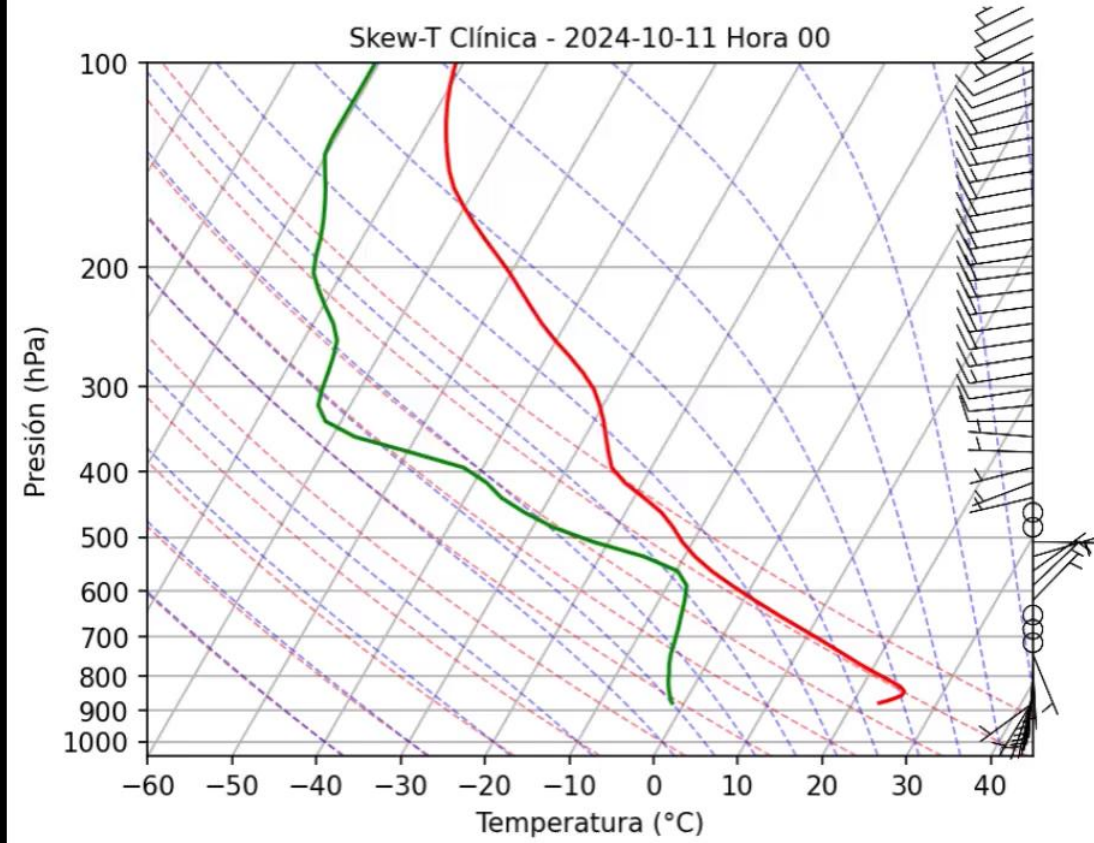
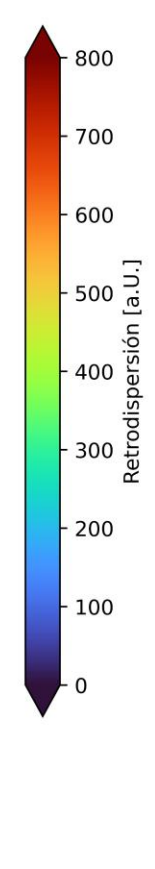
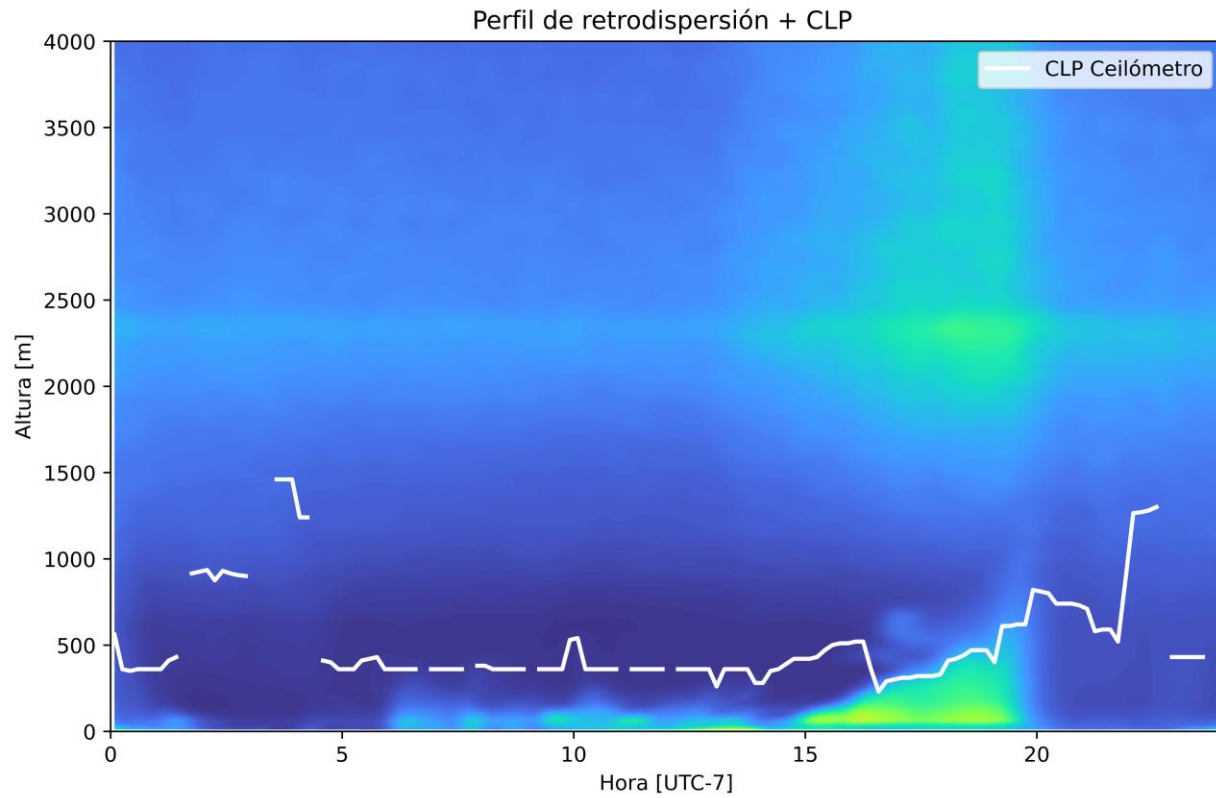
Sin filtro

Con filtro



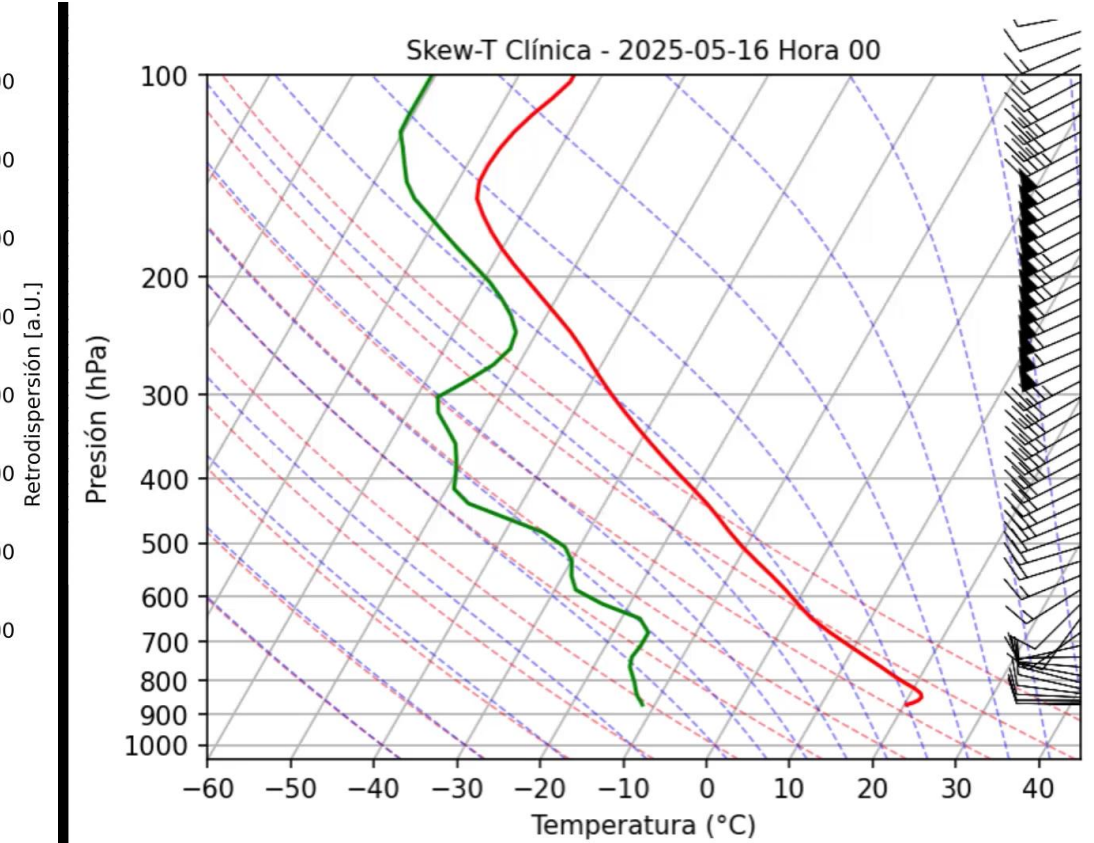
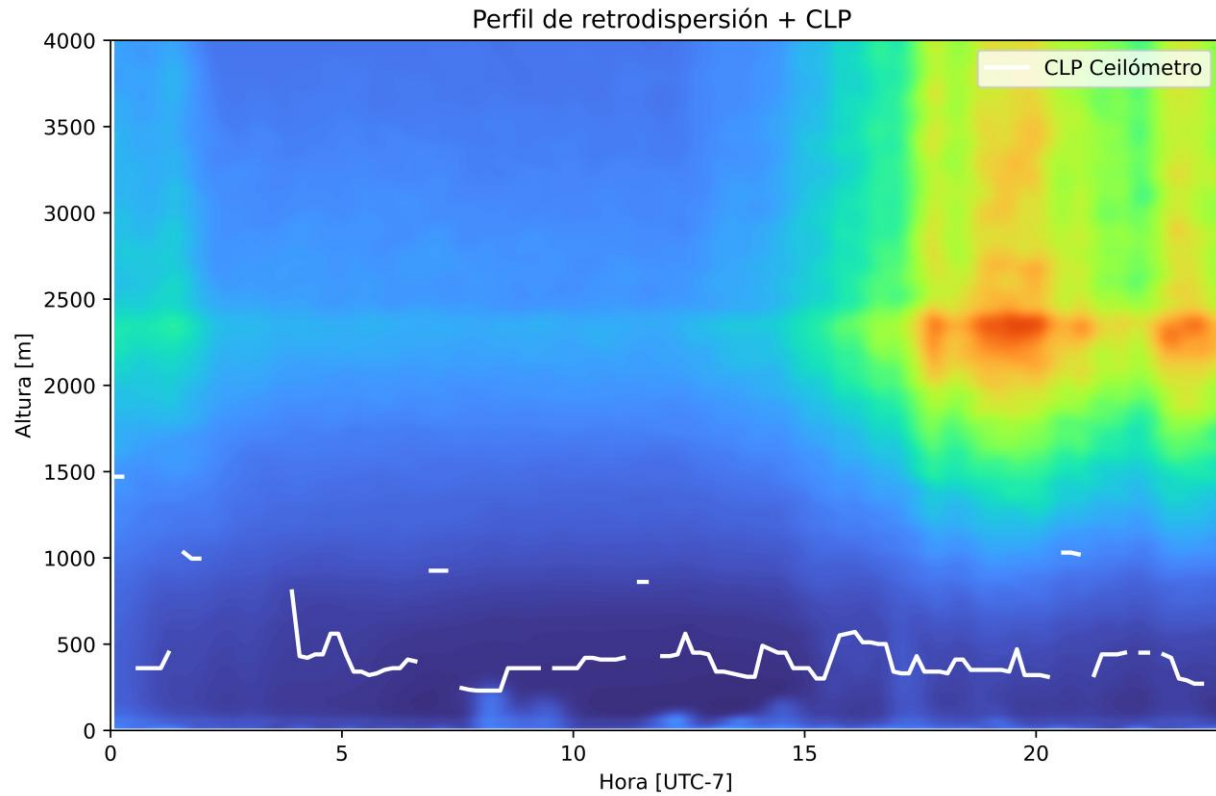
Casos representativos (Sin transporte vertical)

- 11 de octubre 2024



Casos representativos (Con transporte vertical)

- 16 de mayo 2025



Conclusiones técnicas

- El filtro de nubes/precipitación **mejora la interpretación** física de la señal
- Se identifica un **aumento de la retrodispersión** entre 1500-3000 metros
 - Asociados con el **perfil de temperatura adiabático seco** y presencia de **cizalladura en niveles medios**
- La interacción entre CLP-PM muestra procesos locales y de transporte regional
- La ausencia de **pavimentación** y de **vegetación** en la zona de estudio genera complicaciones en la caracterización de la CLP

Implicaciones y relevancia binacional

- La combinación de **observaciones de ceilómetro, modelación (WRF) y mediciones de superficie** permite caracterizar integralmente la estructura vertical y superficial del material particulado
- La detección de **capas residuales y transporte vertical** es fundamental para explicar episodios de PM que no se originan localmente, lo cual es crítico en una **cuenca binacional** como Paso del Norte
- La **cooperación binacional** es clave para:
 - estandarizar métodos de monitoreo,
 - validar modelos numéricos,
 - y fortalecer estrategias de mitigación coordinadas.
- En conjunto es una herramienta estratégica para mejorar la **gestión, el pronóstico y sistemas de alerta temprana** en episodios de contaminación.

Agradecimientos



CECATEV

CENTRO DE CIENCIAS ATMOSFÉRICAS
Y TECNOLOGÍAS VERDES



Fondo para la Calidad del Aire (FCA) administrado por el **Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN)** por su apoyo en la gestión y operación de la red de estaciones de la calidad del aire en Ciudad Juárez.



LaNCAC



¡Ahora somos Laboratorio Nacional CONACYT!

Laboratorio Nacional Conacyt sobre Atmósfera y Clima



LaNCAC estudia aspectos físicos, químicos, biológicos y antropológicos relacionados con la atmósfera y el cambio climático. De manera interdisciplinaria mide y modela variables climáticas y ambientales.