

IMPACTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AEROSOLES EN LA FORMACIÓN DE NUBES FRÍAS EN MICROCLIMAS PRESENTES EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Sebastián Mendoza-Téllez¹, Bingbing Wang², Jiyu Gao², Alison Ruiz³, Graciela B. Raga¹, Emma Negrete¹, Harry Alvarez⁴, Javier Miranda⁵, Karla Valdés⁶, David Ramirez⁶, Jan Alexis Cedillo⁷, Irma Rosas¹, Leticia Martinez¹, Eva Salinas¹, Fernanda Córdoba¹, Montserrat Silva¹, Angélica Pérez¹ y Luis A. Ladino¹

¹ **Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma De México, México**

² Laboratorio Estatal de Ciencias Ambientales Marinas, Universidad De Xiamen, China

³ División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México

⁴ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma De México, México

⁵ Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma De México, México

⁶ Sistemas Biológicos, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, México

⁷ Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, México

sebastian.mendoza@atmosfera.unam.mx

DÉCIMO CONGRESO COLOMBIANO Y CONFERENCIA INTERNACIONAL CALIDAD DE AIRE, CAMBIO CLIMÁTICO Y SALUD PÚBLICA (CASAP X)

14, 15 y 16 de mayo de 2025

CIUDAD DE MÉXICO (CDMX)

- En 2022, la CDMX registró una concentración promedio anual de $\text{PM}_{2.5}$ de **$19 \mu\text{g}/\text{m}^3$** (la **OMS** recomienda **$12 \mu\text{g}/\text{m}^3$**).
- Al ser una megaciudad, la CDMX presenta la **formación de microclimas** en distintas zonas (Amador-Muñoz et al., 2013).

Figura 1. Ciudad de México durante contingencia ambiental. Tomada de <https://aristeguinoticias.com/0204/mexico/cdmx-doble-hoy-no-circula-p-contingencia-ambiental/>

Población de la
ZMVM
21.2 millones

de automóviles en
la ZMVM
9.6 millones



CIUDAD DE MÉXICO (CDMX)

- Parece existir una clara distinción en la **composición química** entre el **norte y sur** de la CDMX (Ladino et al., 2018).

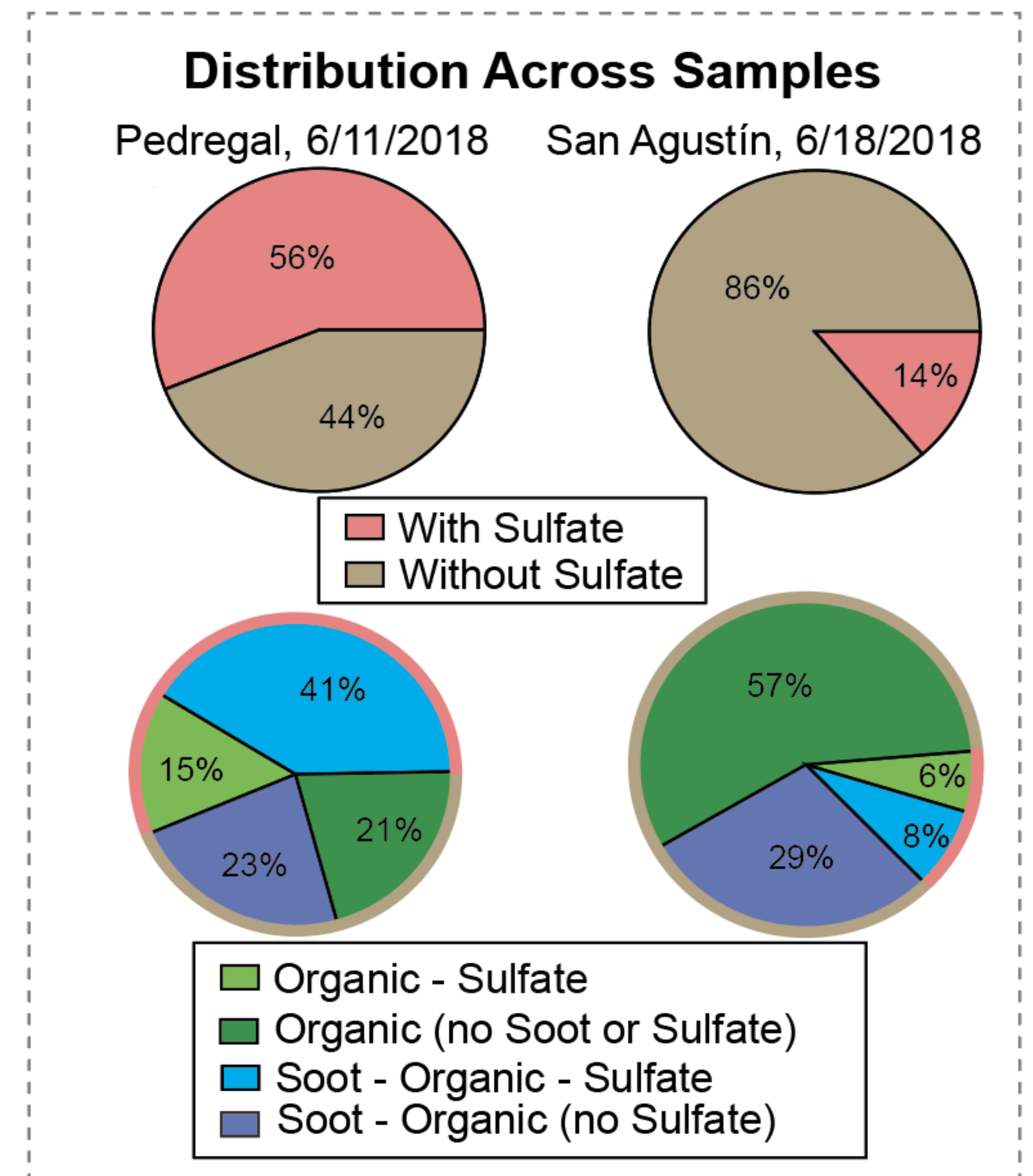
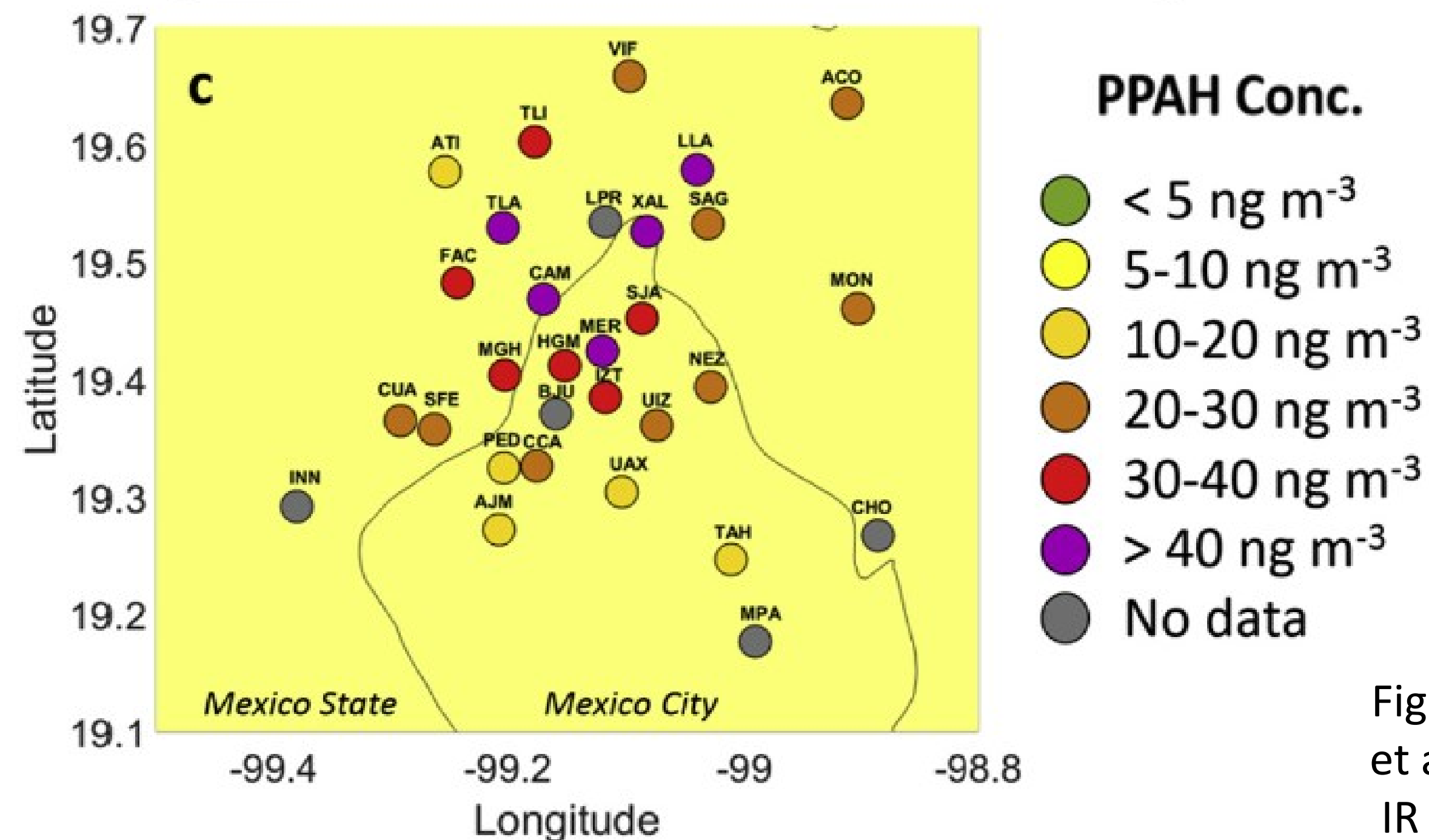


Figura 2. Izquierda: Concentración de PPAH a lo largo de la CDMX (Ladino et al., 2018). Derecha: Distribución en composición a través de análisis de IR y Raman en el norte (San Agustín) y sur (Pedregal) de la CDMX (Cooke et al., 2024).

EFFECTOS IMPORTANTES DE LOS AEROSOL

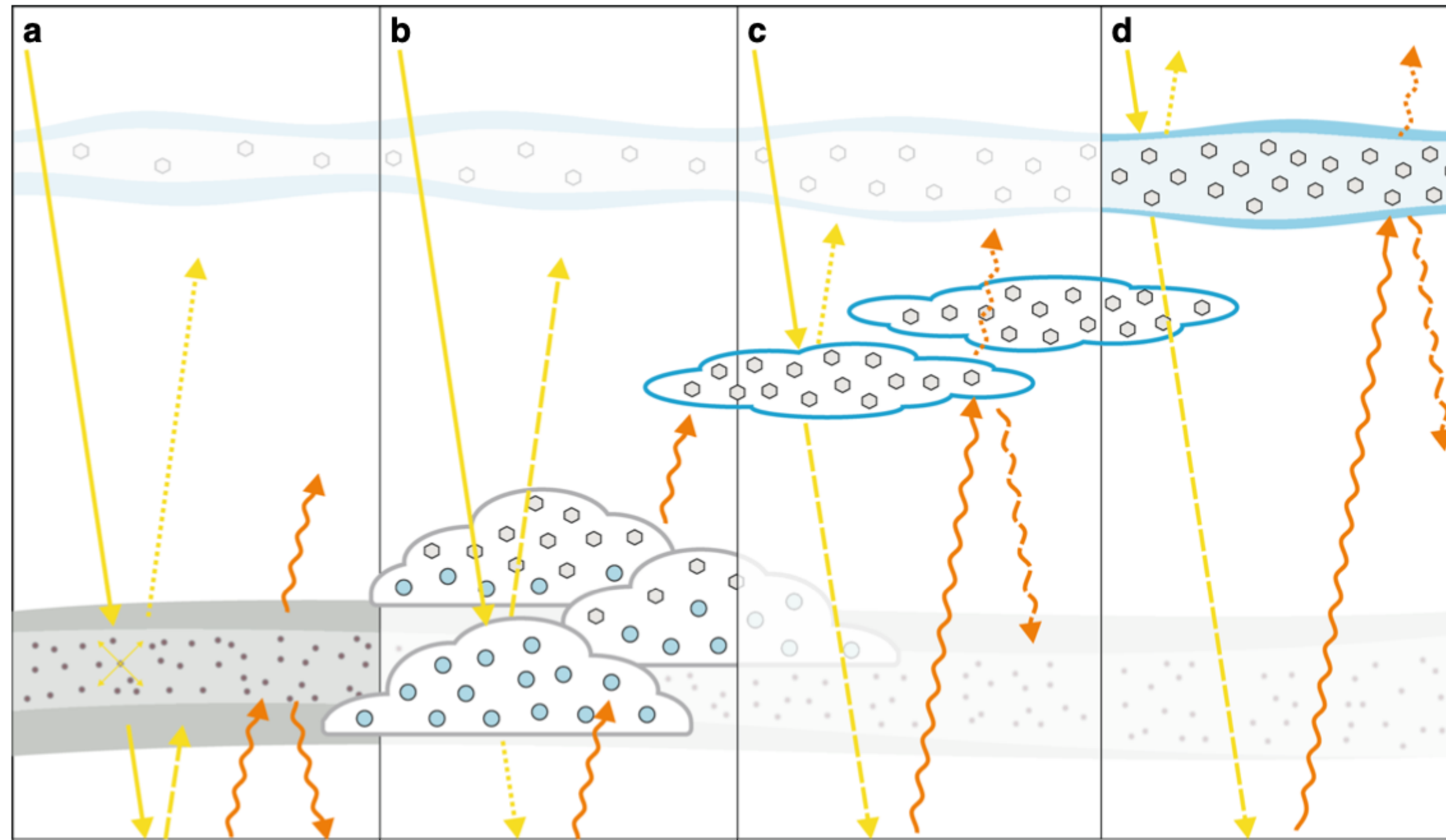
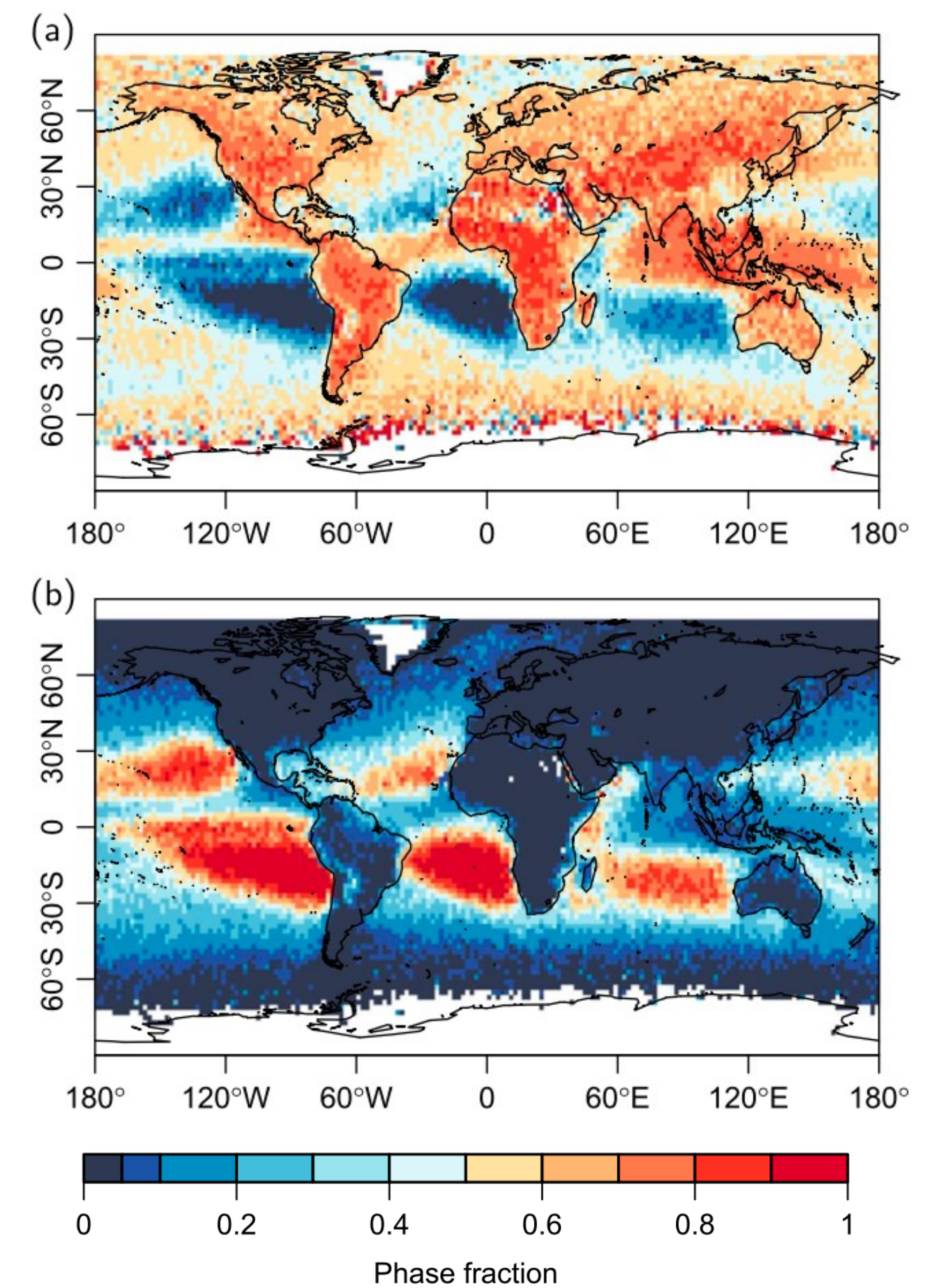


Figura 3. Izquierda: Efecto invernadero causado por: a) aerosoles; b) nubes bajas; c) nubes medias y d) nubes altas (Kärcher, 2018). Derecha: Fracción promedio de la precipitación generada por nubes (a) frías (con hielo) y (b) líquidas (sin hielo) para el periodo 2006-2011 (Mülmenstädt et al., 2015).



- Los aerosoles juegan un papel importante en el **balance radiativo planetario**.
- La **precipitación en los continentes** se desarrolla principalmente en las **nubes** que tienen **hielo**. 4

NÚCLEOS DE HIELO (INP_s)

- Existen diferentes 4 mecanismos de **nucleación heterogénea del hielo** en las nubes (i.e., necesitan **partículas de aerosol**).
- El enfoque está sobre aquellas nubes que presentan **cristales de hielo** en su composición.
- Mecanismo de **inmersión** (nubes **mixtas**) y mecanismo de **depósito** (nubes **cirrus**).

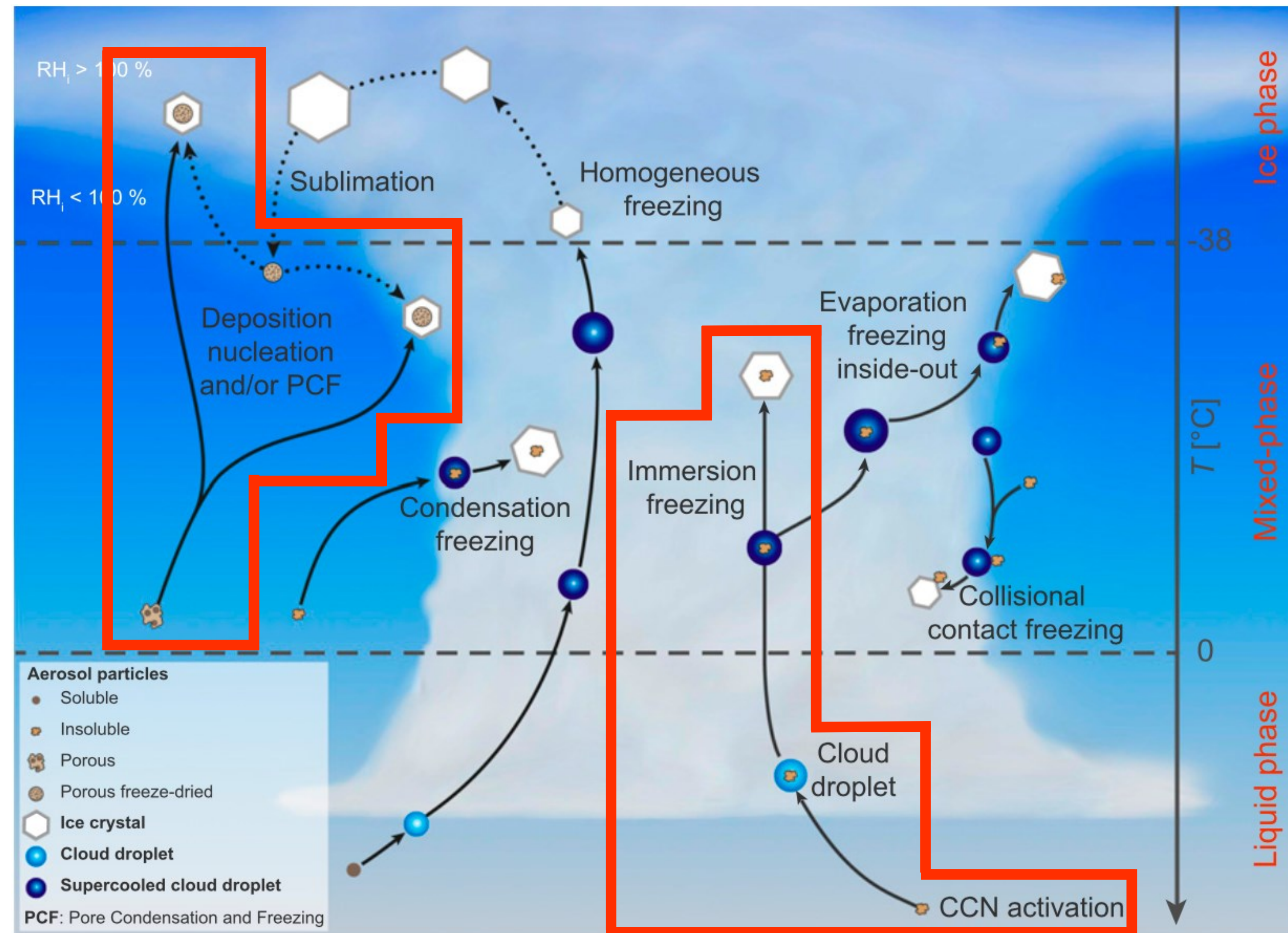


Figura 4. Distintas vías y mecanismos de nucleación de hielo en las nubes (Kanji et al., 2017).

NORTE (C5) VS. SUR (CU)

- Campañas de muestreo:
 - 1) 12-20 de mayo de 2022
 - 2) 11 y 18 de septiembre de 2024.

Campaña 1

En cada sitio de muestreo:

- 2 MiniVol
- 1 Biomuestreador
- 1 Impactador en cascada (MOUDI)
- 1 Estación Meteorológica
- 1. $PM_{2.5}$, CO, NO_x , SO_2 , y O_3

Análisis:

- Composición elemental (XRF)
- Composición iónica (IC)
- Contenido de carbono (OC/EC)
- Contenido Biológico
- Retrotrayectorias de las masas de aire
- Nucleación de nubes mixtas (UNAM-DFT)

Campaña 2

En cada sitio de muestreo:

- 1 Impactador en cascada (MOUDI)

Análisis:

- Morfología y composición elemental (CCSEM/EDX)
- Retrotrayectorias de las masas de aire
- Nucleación de nubes cirrus (XMU-INC)

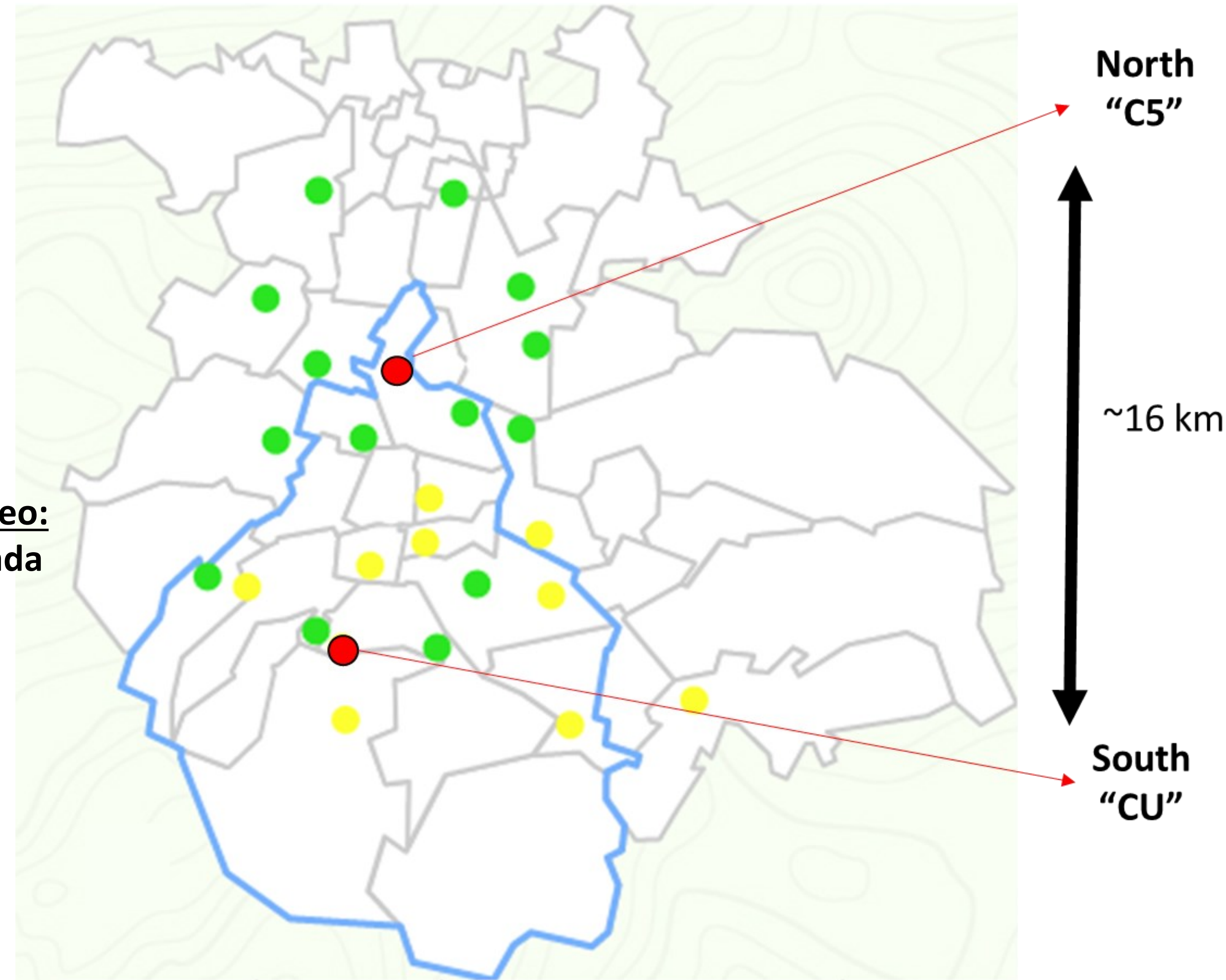
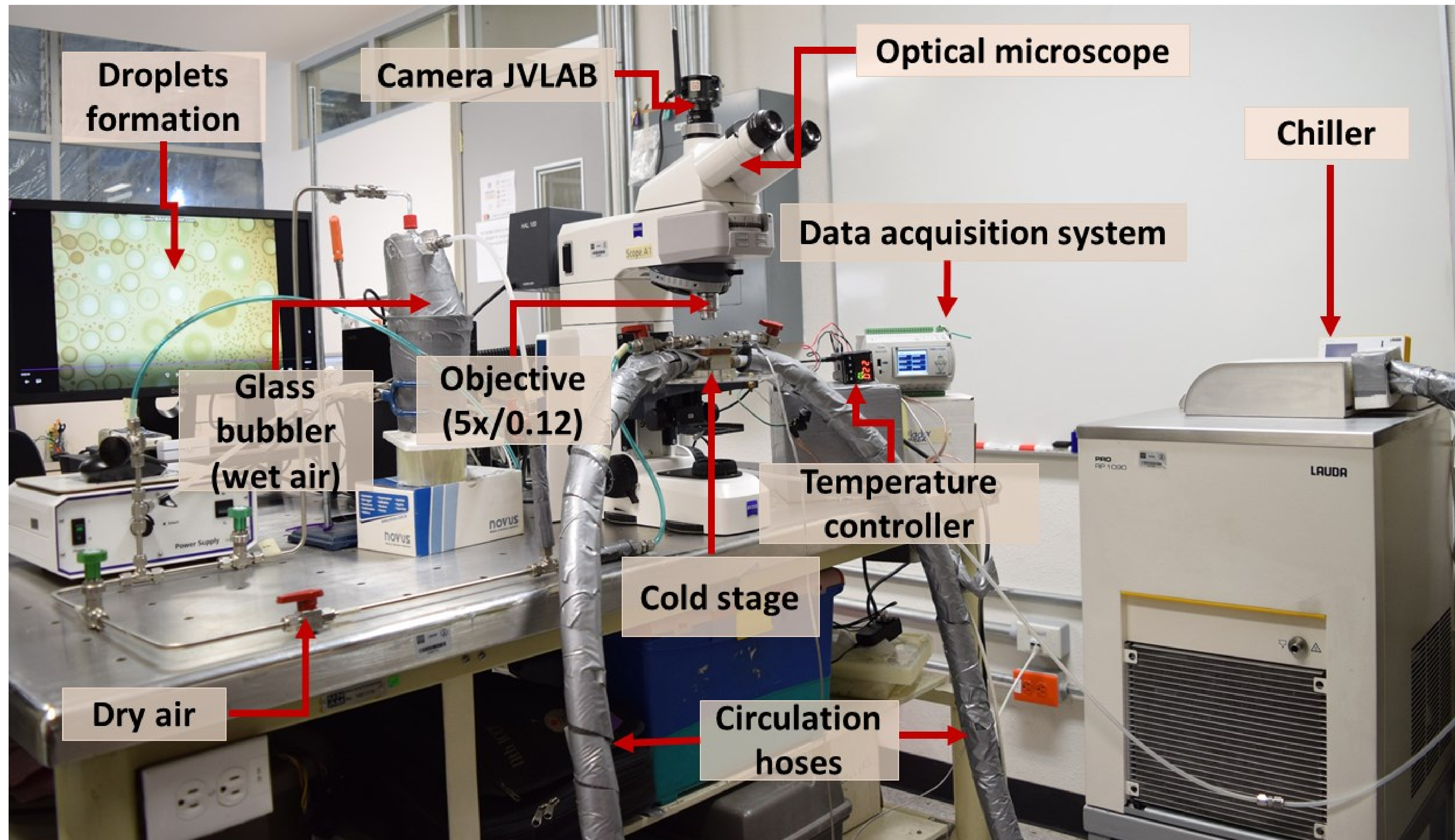


Figura 5. Mapa de la Ciudad de México que muestra las ubicaciones de muestreo en el norte (North "C5") y sur (South "CU") de la ciudad. Mendoza-Téllez et al. (en prep, 2025).

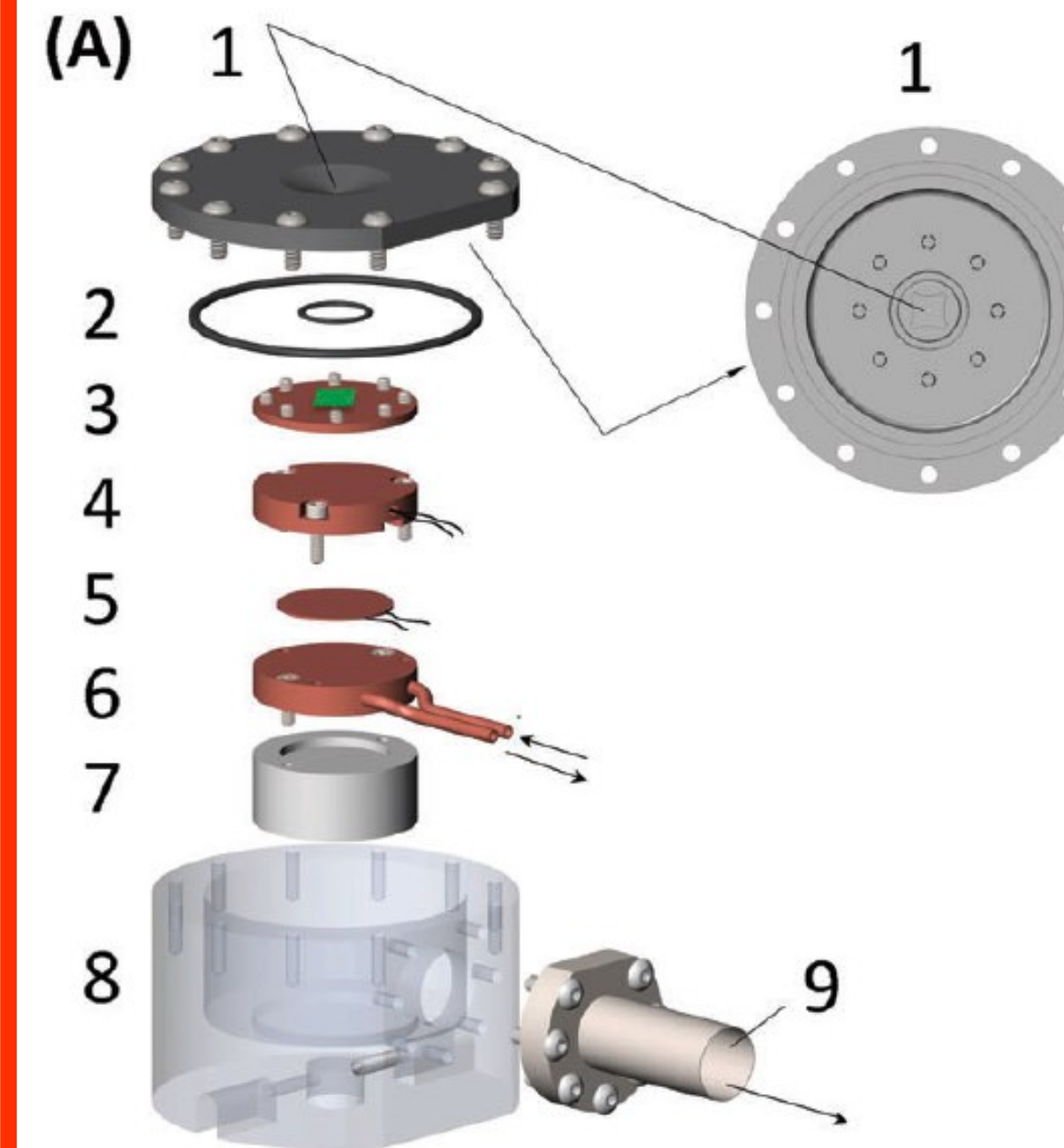
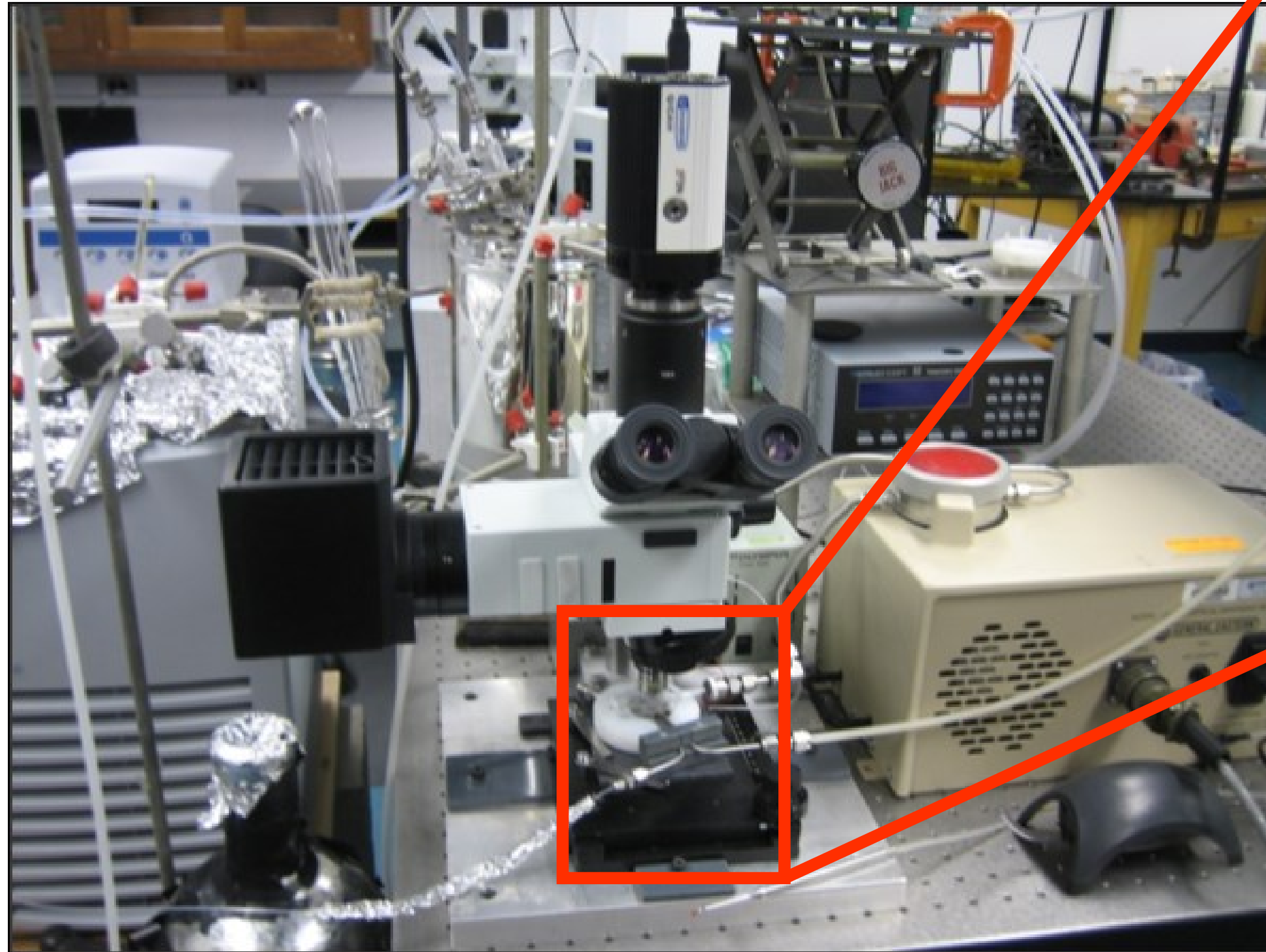
UNAM-MOUDI-DROPLET FREEZING TECHNIQUE (UNAM-MOUDI-DFT)



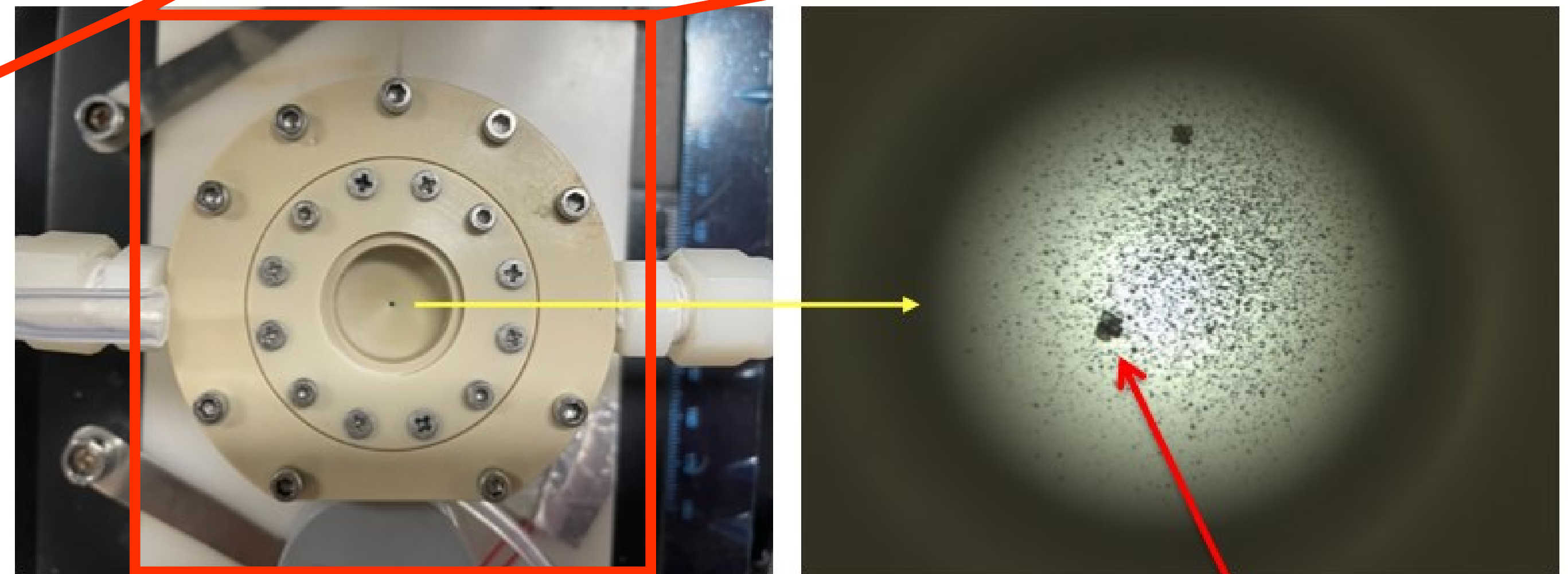
- Simula la formación de hielo por el mecanismo de inmersión
- Estudia las nubes mixtas (gotas de nube + cristales de hielo)

Figura 6. Configuración experimental del MOUDI-UNAM-DFT con sus componentes principales (Córdoba et al., 2021).

XIAMEN UNIVERSITY – ICE NUCLEATION CHAMBER (XMU-INC)



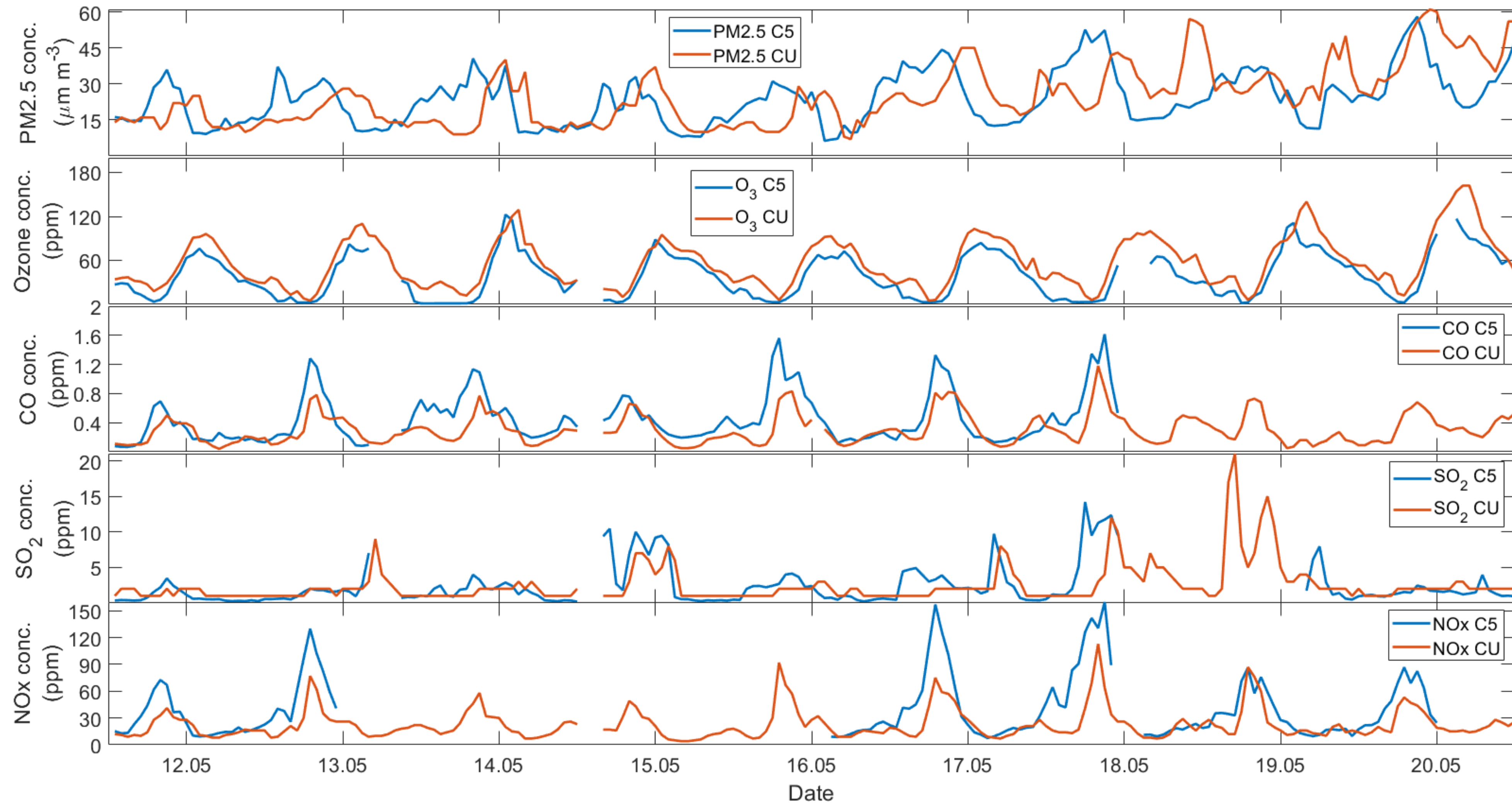
- Simula la formación de hielo por el mecanismo de depósito.
- Estudia las nubes cirrus.



Ice crystal

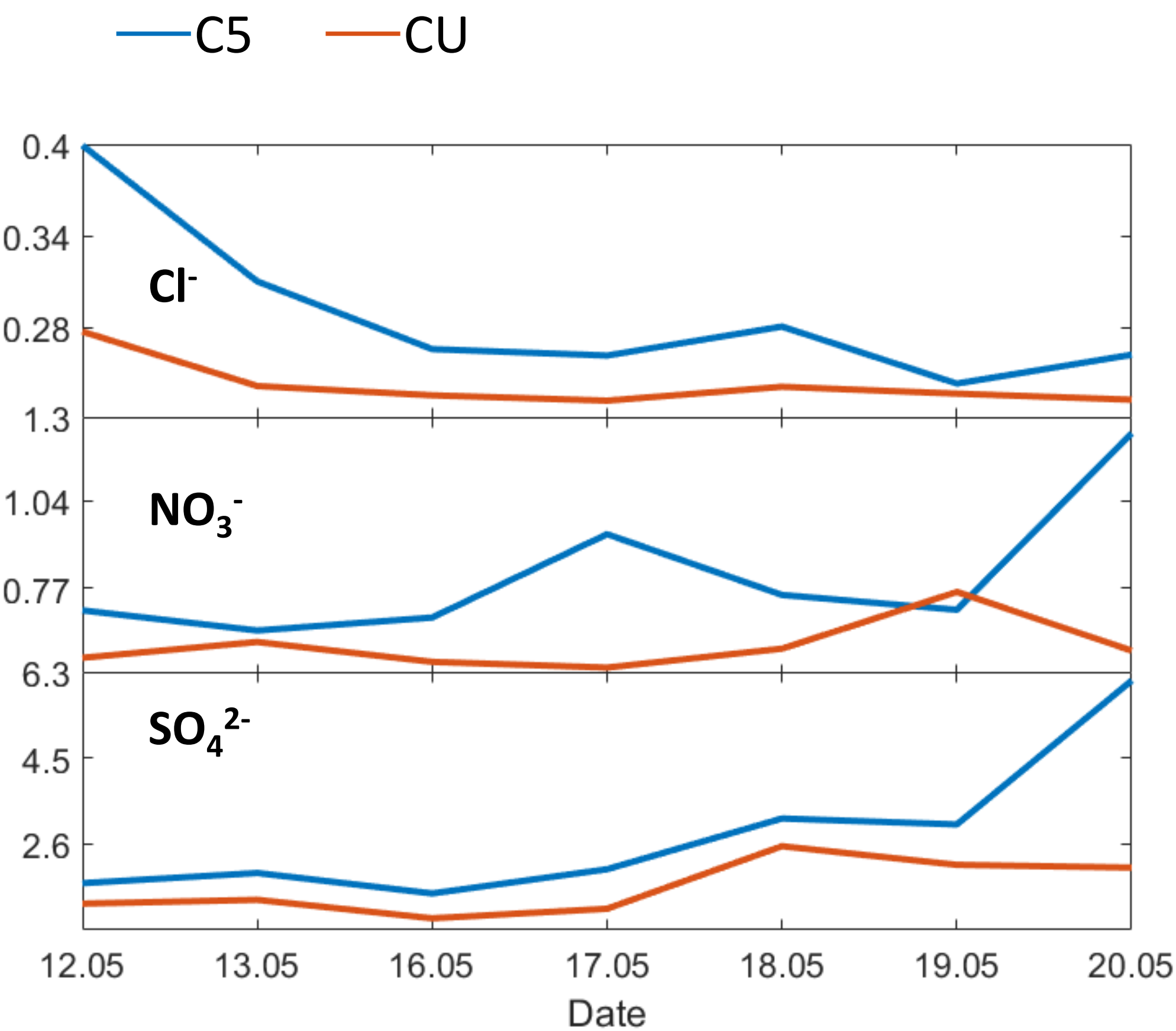
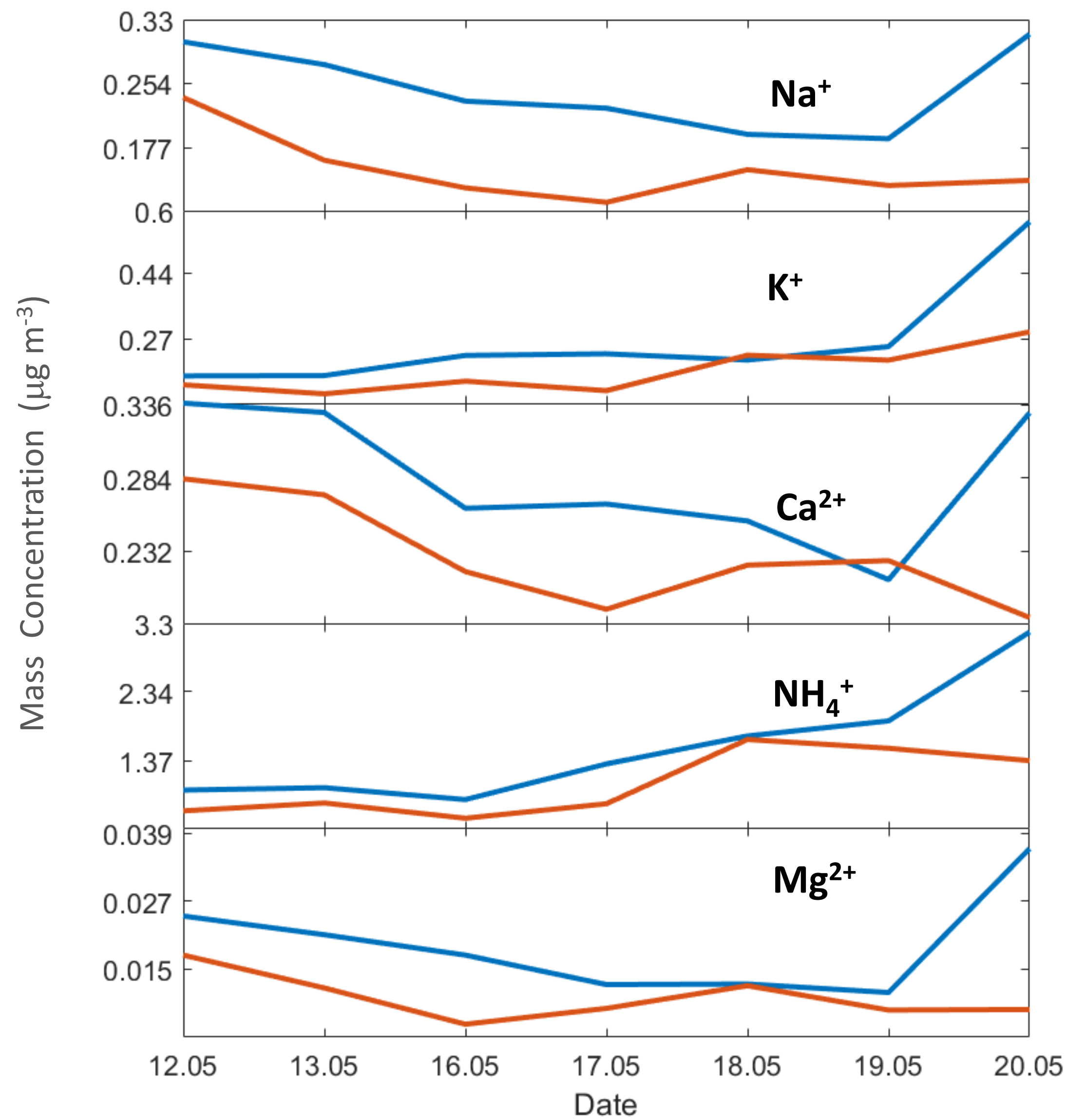
Figura 7. Diagrama esquemático de la celda fría del XMU-INC (Wang et al., 2016).

PM_{2.5} Y CONTAMINANTES CRITERIO



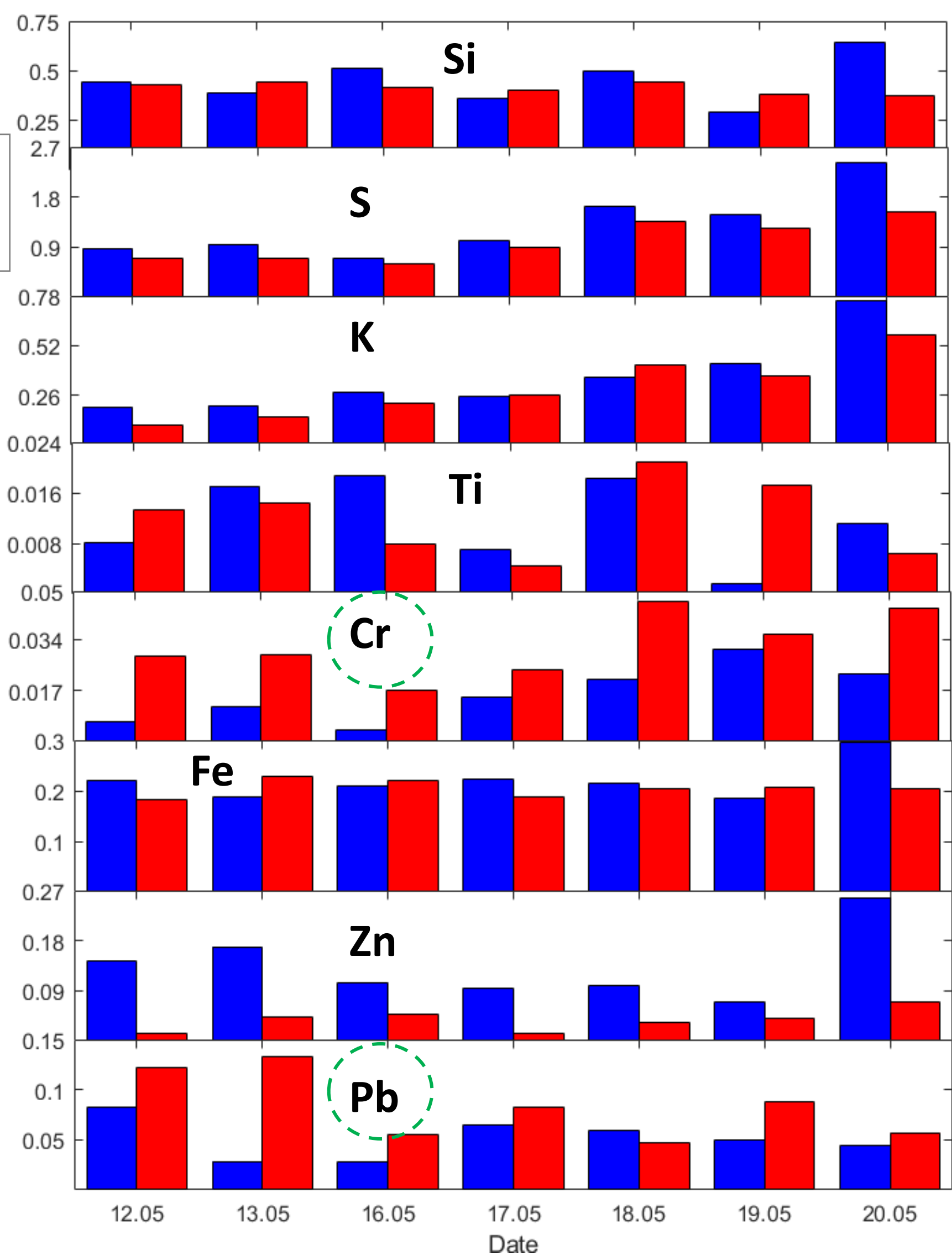
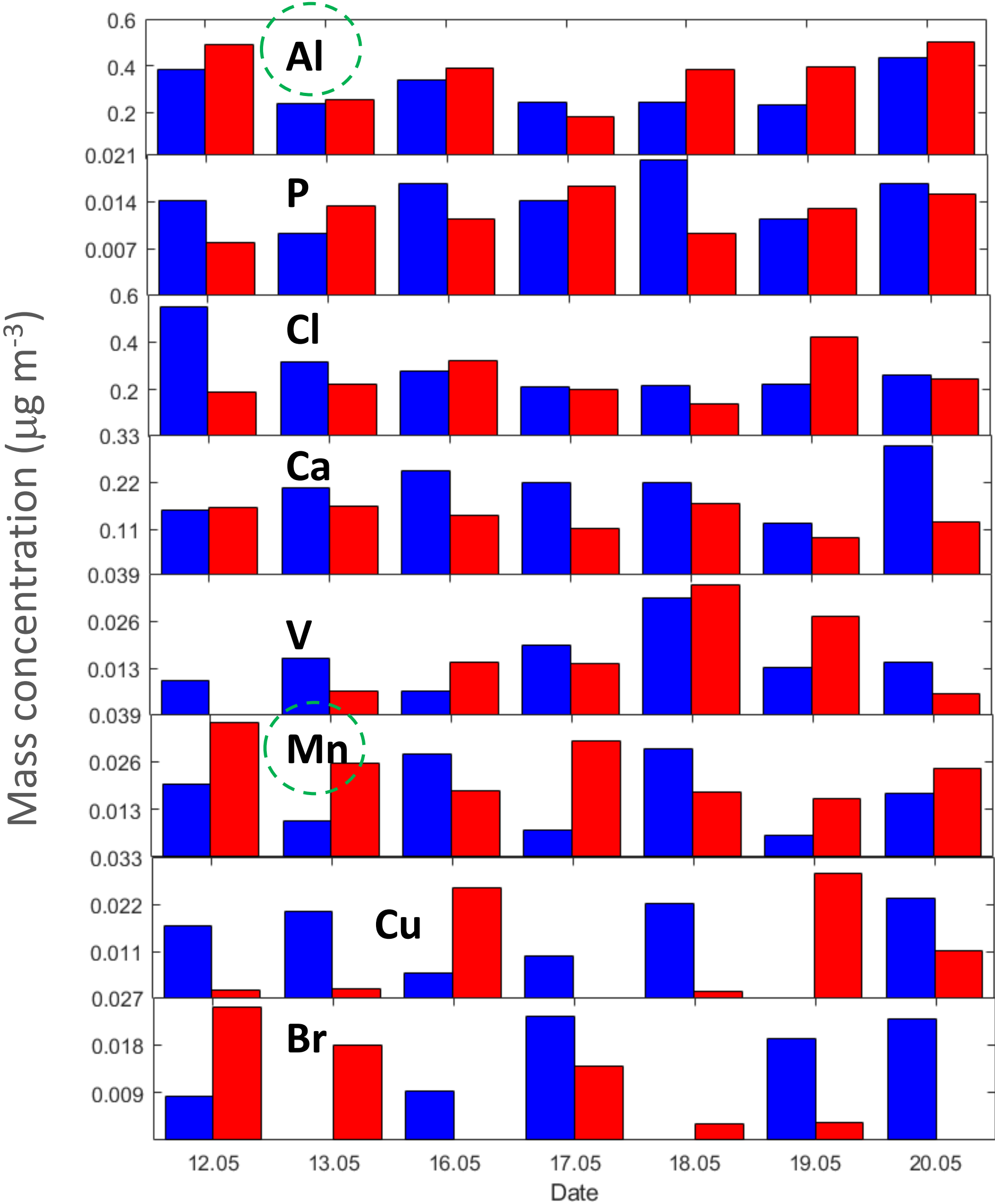
Si bien la concentración de **PM_{2.5}** es similar en ambos puntos de muestreo, la **concentración** de los **contaminantes criterio** es **mayor** en el norte de la CDMX, a excepción del **ozono**.

COMPOSICIÓN IÓNICA



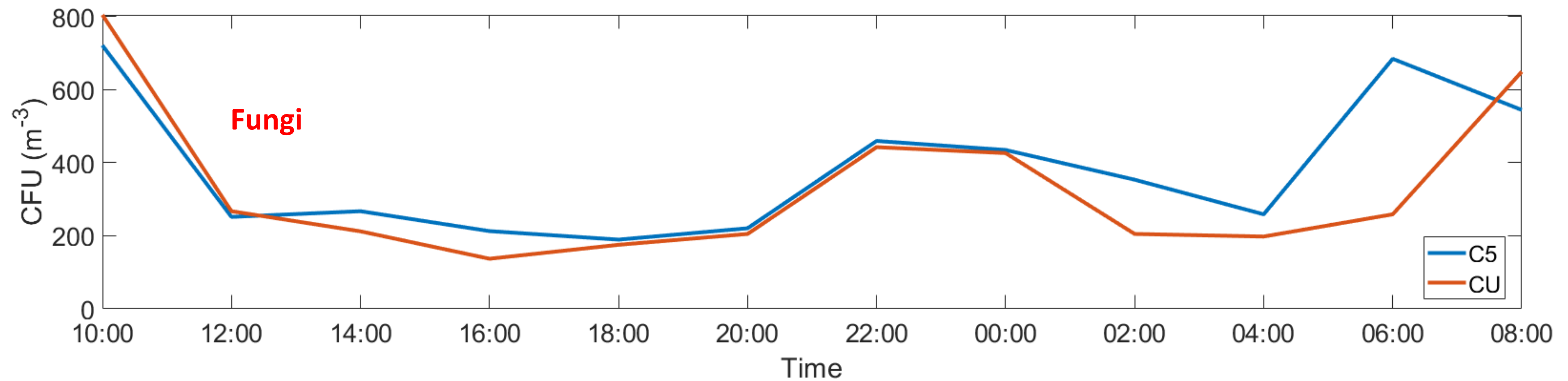
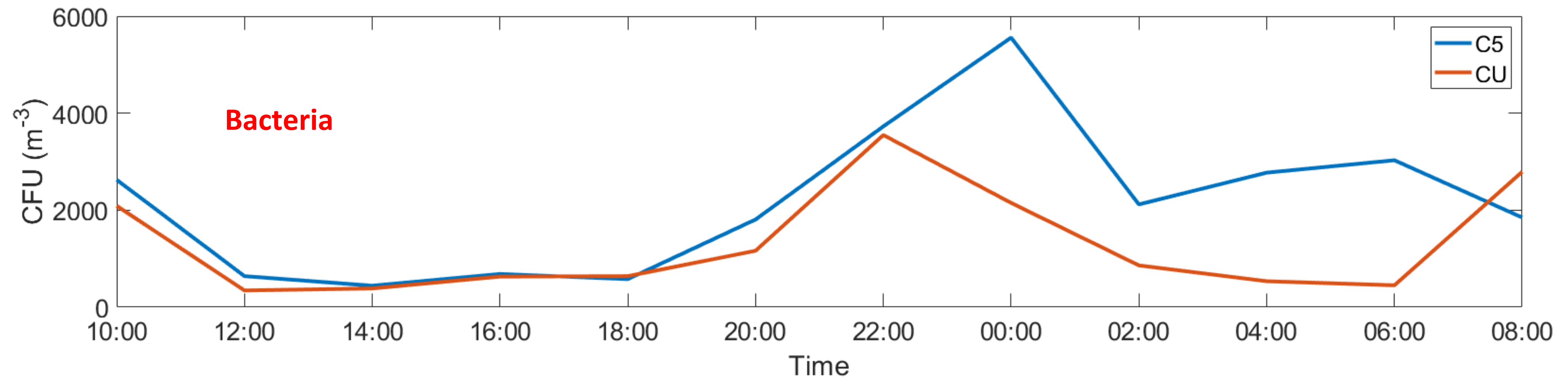
La **concentración** de todos los **cationes y aniones** es **mayor** en el norte de la CDMX.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL



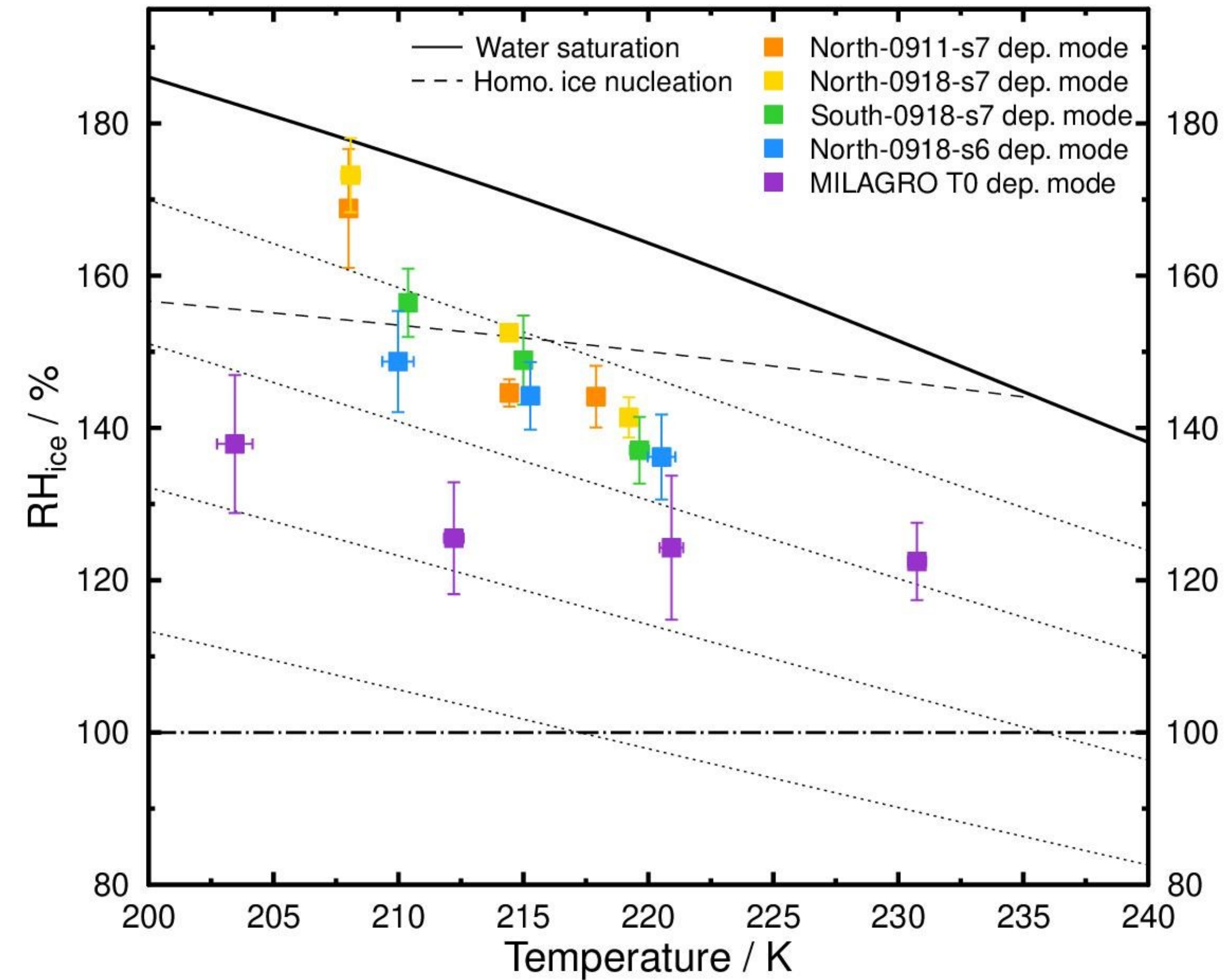
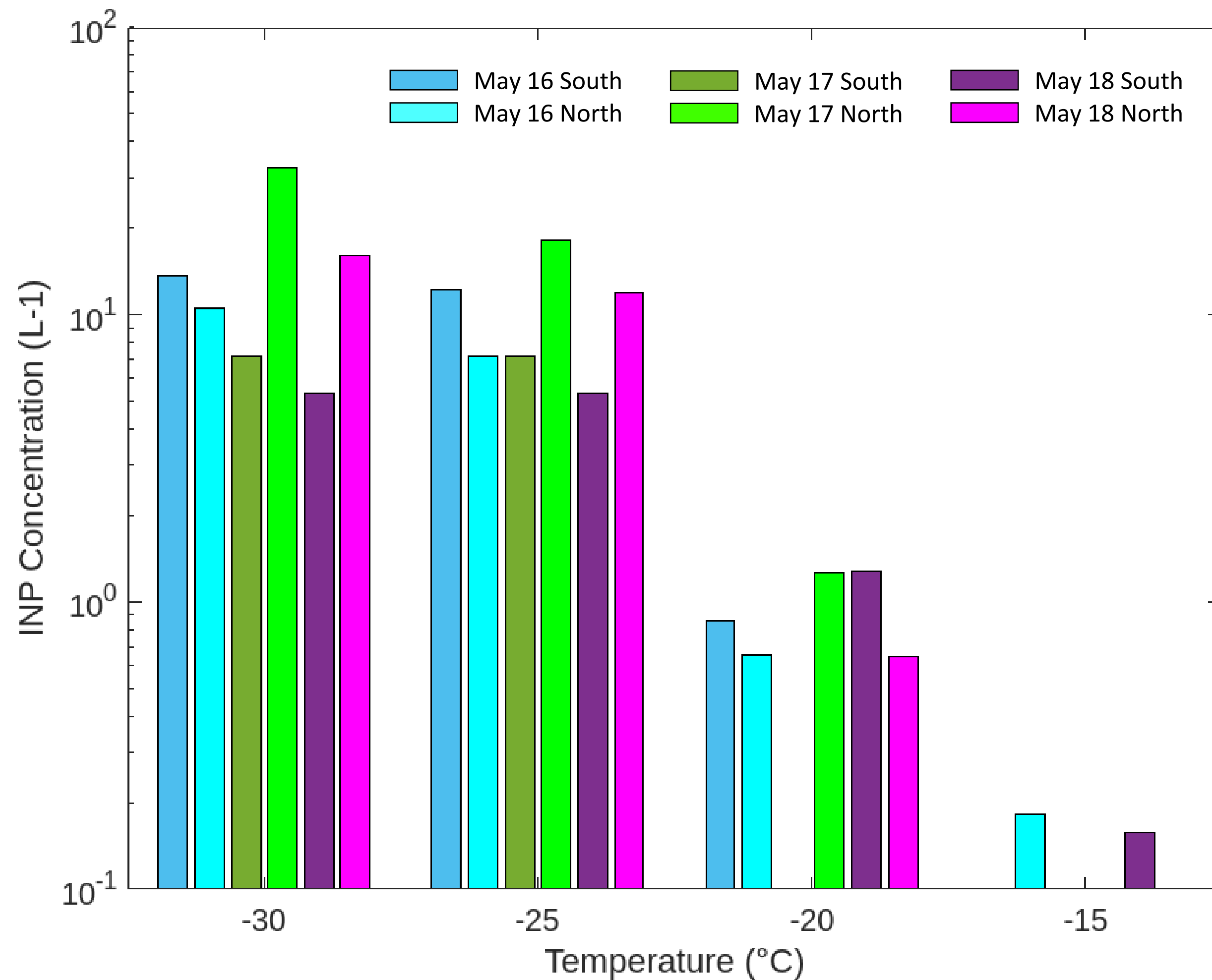
La concentración de 12 (no resaltados) de los 16 elementos analizados es mayor en el norte de la CDMX.

CONTENIDO BIOLÓGICO



Los perfiles diarios muestran que la **concentración de bacterias y hongos es mayor** en el norte de la CDMX.

NUBES MIXTAS Y NUBES CIRRUS

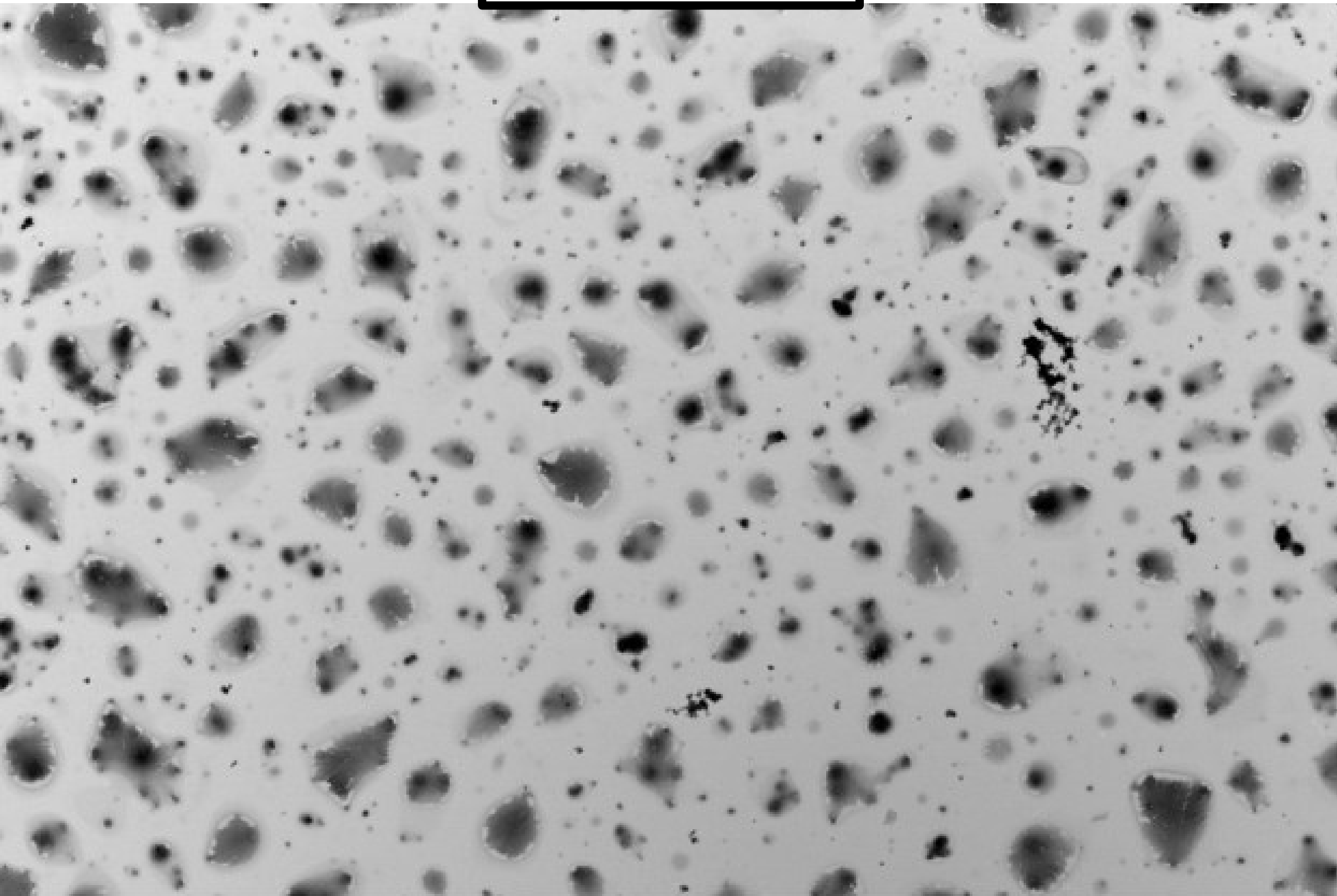


- La **concentración total** de INPs para la formación de **nubes mixtas (inmersión)** es **mayor** en el **norte** de la CDMX.

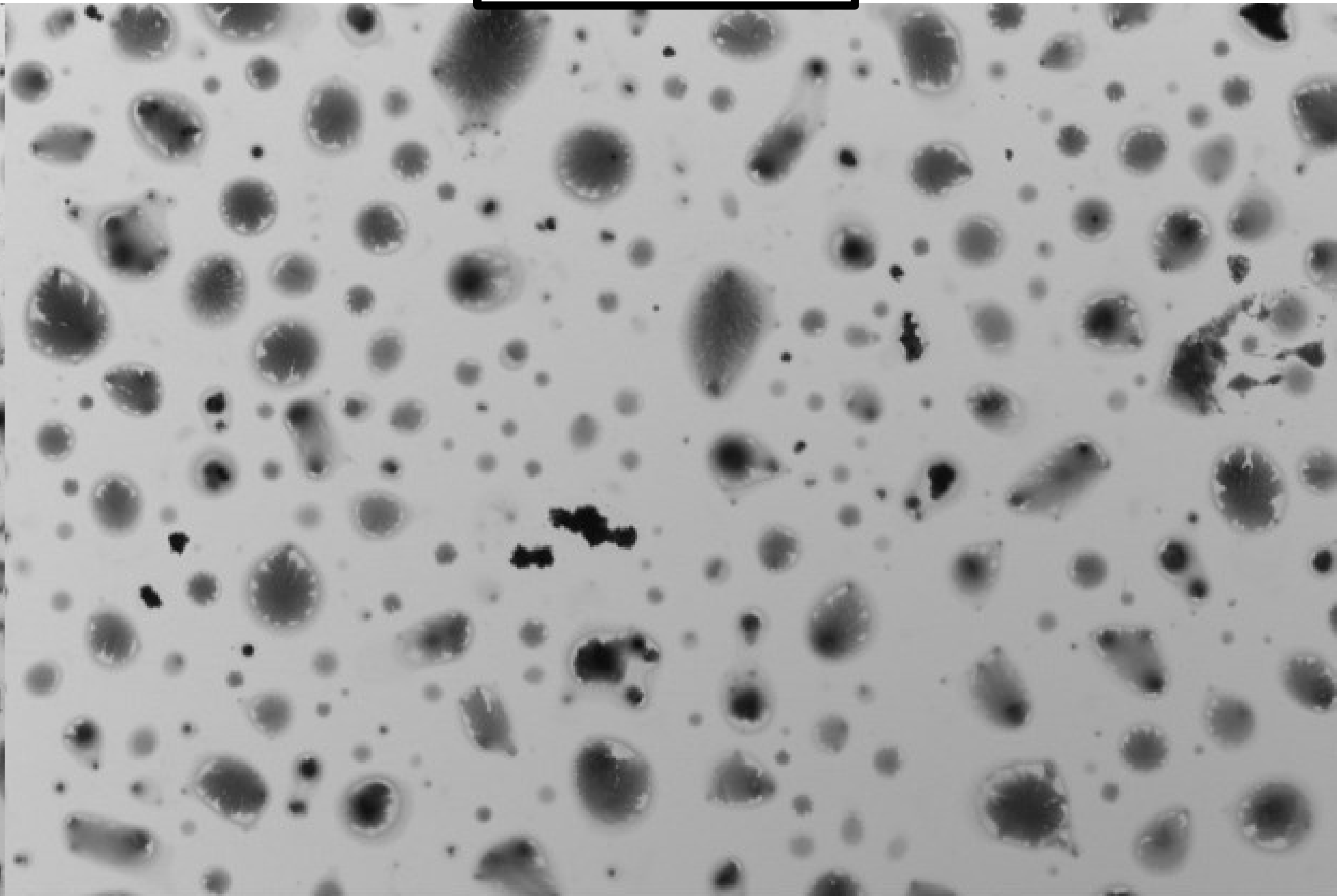
- Las **habilidades como INPs** para la formación de **nubes cirrus (depósito)** son **similares** en el **norte y sur** de la CDMX.

MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS

North "C5"



South "CU"



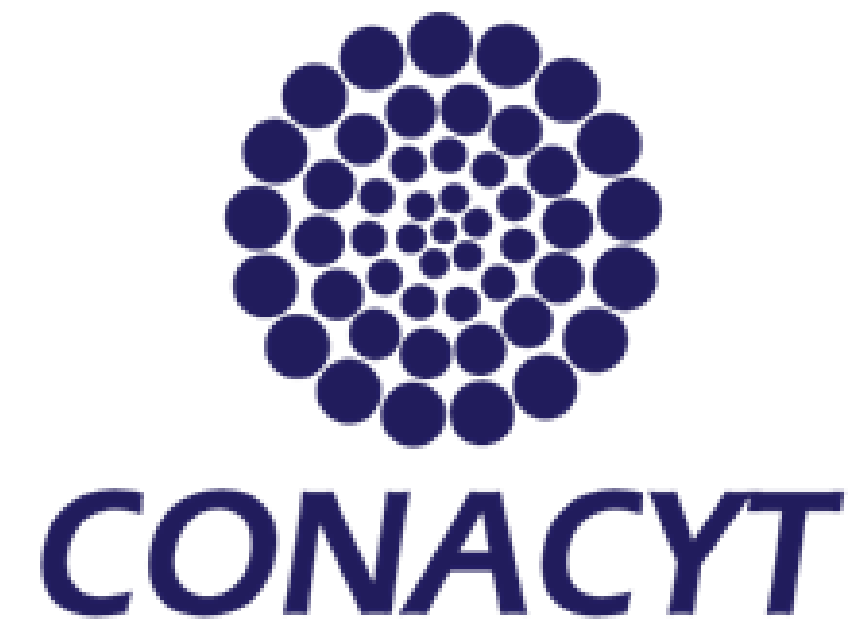
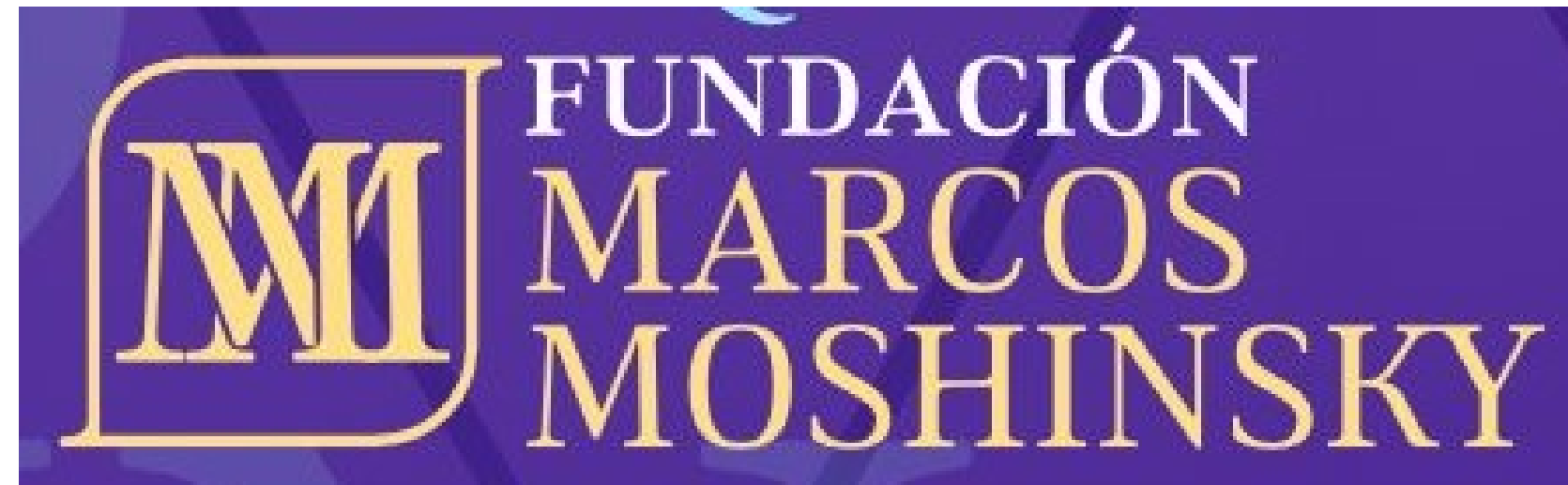
	10/6/2024 1:56:55 PM	mode BF	HV 20.00 kV	spot 3.5	WD 8.4 mm	HPW 41.4 µm	mag 5 000 x	srot 34 °	tilt 0 °	5 µm	
										XMU	
	10/7/2024 8:48:26 AM	mode BF	HV 20.00 kV	spot 3.5	WD 8.4 mm	HPW 41.4 µm	mag 5 000 x	srot 22 °	tilt 0 °	5 µm	
										XMU	

La **morfología y tamaño** puede ser un **factor importante** al evaluar las habilidades como **INPs** de partículas de CDMX en la formación de **nubes cirrus (depósito)**.

MENSAJES PARA LLEVAR A CASA

- Existe una clara diferencia en la composición química entre los microclimas del norte y sur de la CDMX.
- La diferencia en composición química se ve traducida en una mayor habilidad para formar nubes mixtas por parte de las partículas del norte de la CDMX.
- La diferencia en composición entre las partículas del norte y sur de la CDMX no se refleja en las habilidades de éstas para formar nubes cirrus.
- Parece existir un factor adicional (morfología, tamaño, etc.) que domina las habilidades como INPs (por depósito) enmascarando la diferencia en composición química entre partículas del norte y sur de la CDMX.

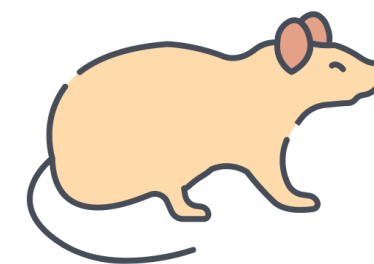
FINANCIAMIENTO



CB-285023



¡GRACIAS
POR TU ATENCIÓN!



REFERENCIAS

- ▶ Amador-Muñoz, O., Bazán-Torija, S., Villa-Ferreira, S. A., Villalobos-Pietrini, R., Bravo-Cabrera, J. L., Munive-Colín, Z., Hernández-Mena, L., Saldarriaga-Noreña, H., & Murillo-Tovar, M. A. (2013). Opposing seasonal trends for polycyclic aromatic hydrocarbons and PM10: Health risk and sources in southwest Mexico City. *Atmospheric Research*, 122, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.003>
- ▶ Cooke, M. E., Waters, C. M., Asare, J. Y., Mirrieles, J. A., Holen, A. L., Frauenheim, M. P., Zhang, Z., Gold, A., Pratt, K. A., Surratt, J. D., Ladino, L. A., & Ault, A. P. (2024). Atmospheric aerosol sulfur distribution and speciation in Mexico city: Sulfate, organosulfates, and isoprene-derived secondary organic aerosol from low NO pathways. *ACS ES&T Air*, 1(9), 1037–1052. <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00048>
- ▶ Córdoba, F., Ramírez-Romero, C., Cabrera, D., Raga, G. B., Miranda, J., Alvarez-Ospina, H., Rosas, D., Figueroa, B., Sung Kim, J., Yakobi-Hancock, J., Amador, T., García, M., Bertram, A. K., Baumgardner, D., & Ladino, L. A. (2021). Measurement report: Ice nucleating abilities of biomass burning, African dust, and sea spray aerosol particles over the Yucatán Peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(6), 4453–4470. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4453-2021>.
- ▶ Kanji, Z. A., Ladino, L. A., Wex, H., Boose, Y., Burkert-Kohn, M., Cziczo, D. J., & Krämer, M. (2017). Overview of Ice Nucleating Particles. *Meteorological Monographs*, 58, 1.1-1.33. <https://doi.org/10.1175/amsmonographs-d-16-0006.1>.
- ▶ Kärcher, B. (2018). Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications*, 9(1), 1824. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>
- ▶ Ladino, L. A., Raga, G. B., & Baumgardner, D. (2018). On particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PPAH) and links to gaseous emissions in Mexico city. *Atmospheric Environment*, 194, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.022>
- ▶ Mülmenstädt, J., O. Sourdeval, J. Delanoë, and J. Quaas (2015), Frequency of occurrence of rain from liquid-, mixed-, and ice-phase clouds derived from A-Train satellite retrievals, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6502–6509, doi:10.1002/2015GL064604.
- ▶ Wang, B., Knopf, D. A., China, S., Arey, B. W., Harder, T. H., Gilles, M. K., & Laskin, A. (2016). Direct observation of ice nucleation events on individual atmospheric particles. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(43), 29721-29731.

DIAPPOSITIVAS

EXTRAS

MECANISMOS DE NUCLEACIÓN

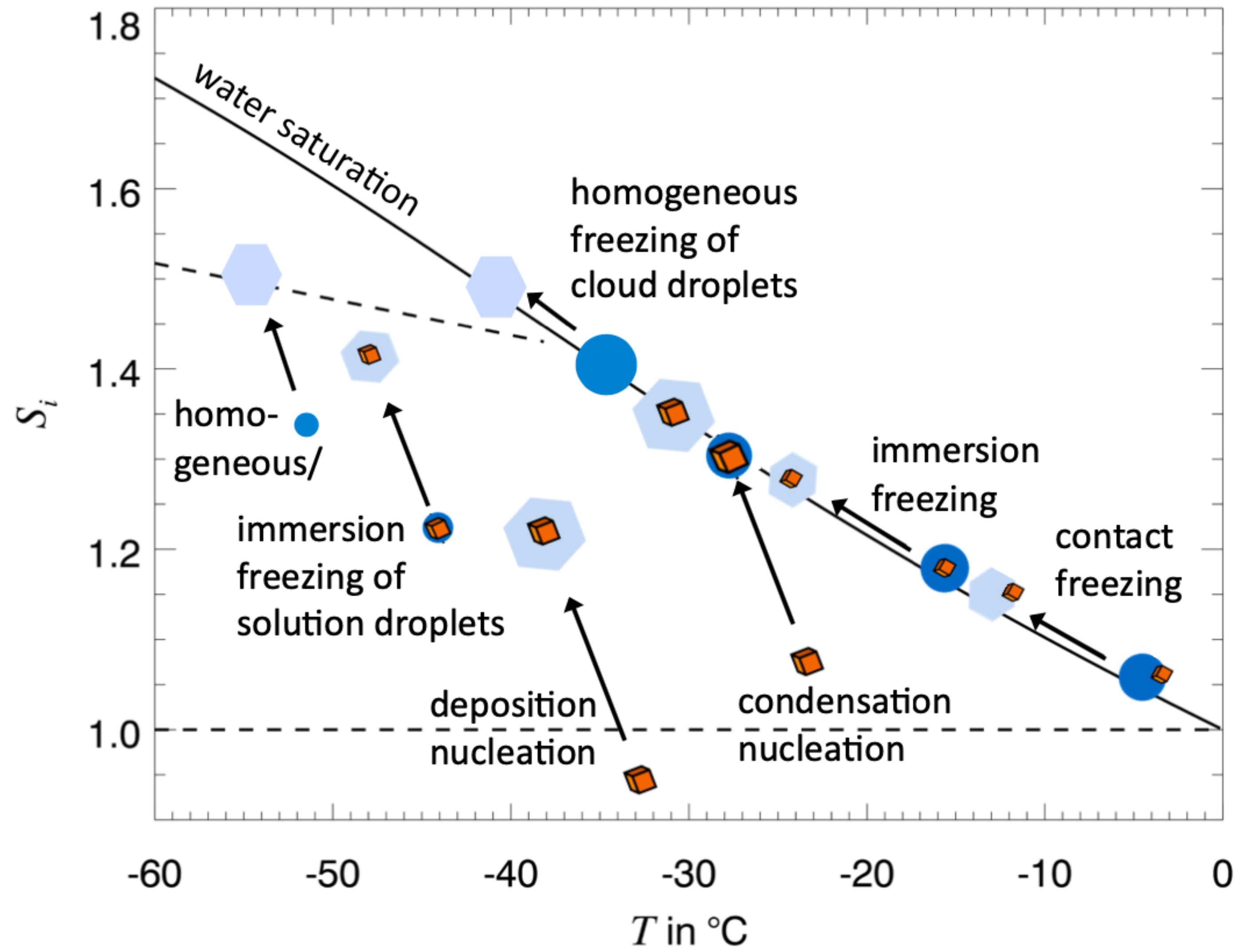


Figura 5. Representación esquemática de los diferentes modos de nucleación. Tomada de Hoose & Mohler (2012).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA FRÍA

Proyecto 1

- No existe un instrumento que simule la formación de nubes cirrus en México.
- Las celdas frías que simulan los mecanismos de depósito y PCF coinciden en el monitoreo de la temperatura y la humedad relativa.

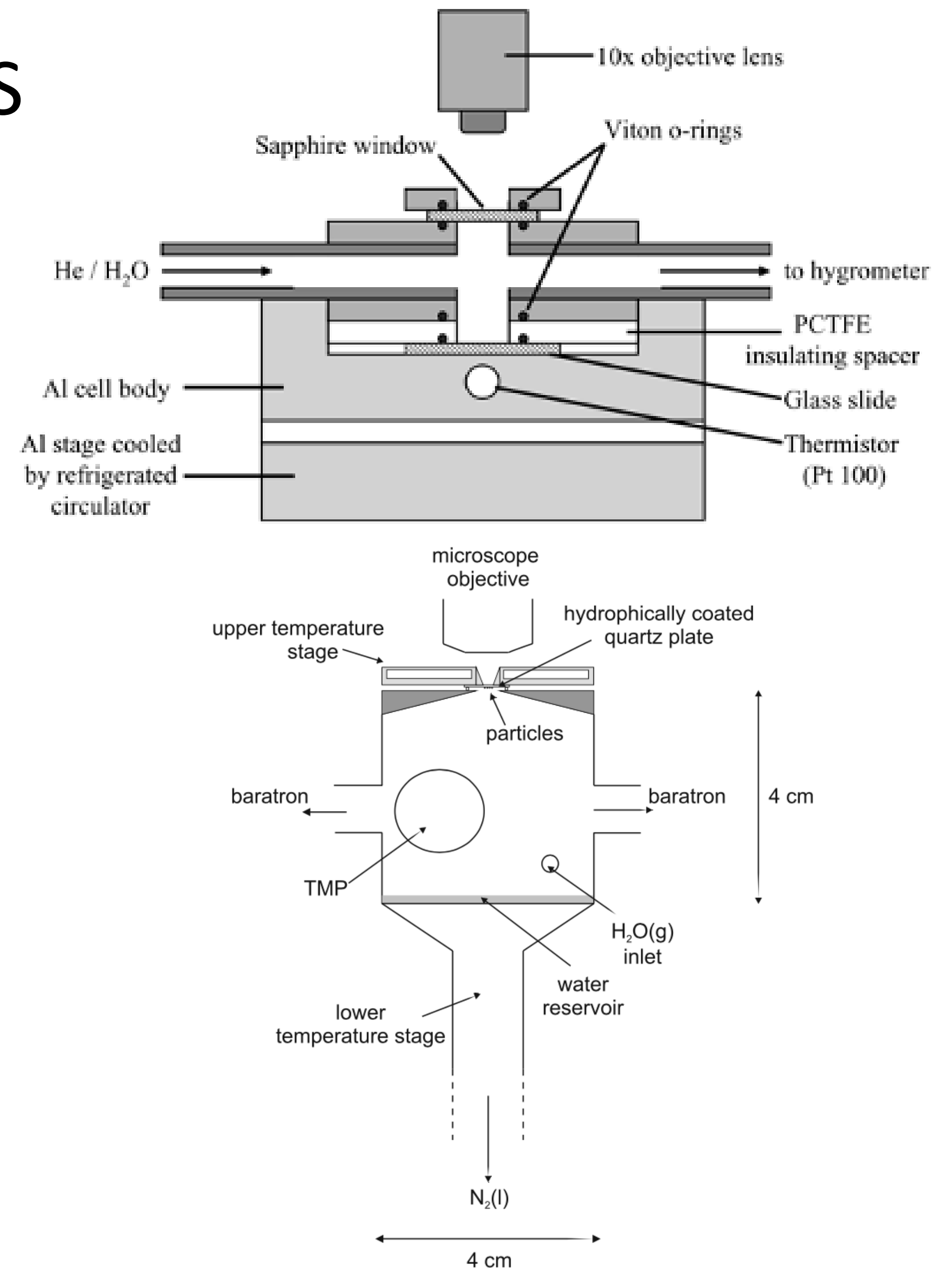


Figura 8. Diagramas de dos diferentes celdas frías. Arriba: Dymarska et al. (2006). Abajo: Knopf & Koop (2006).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA FRÍA

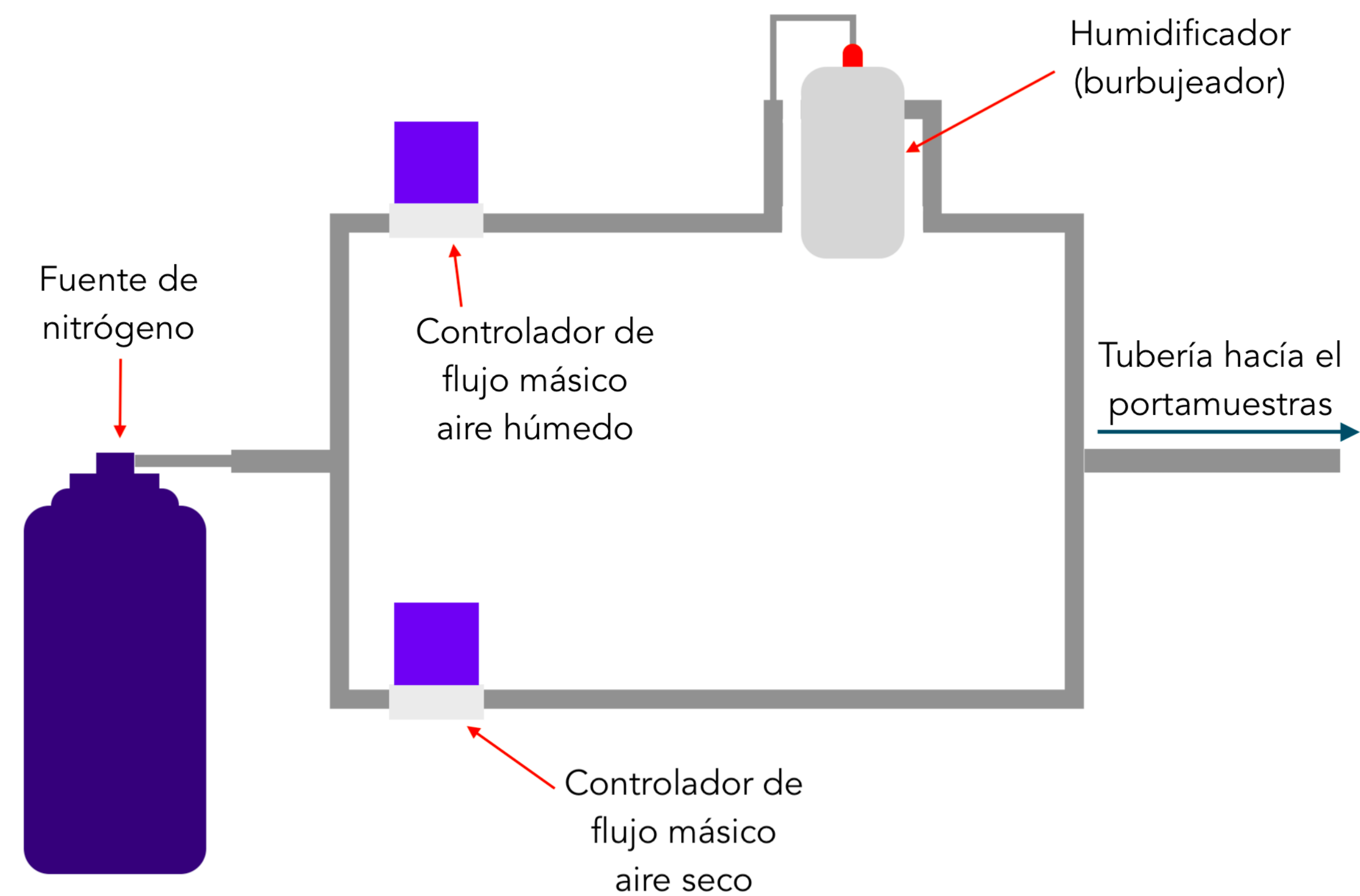


Figura 9. Esquema gráfico de la propuesta de construcción para el sistema de aire húmedo/seco de la UNAM-DFT.

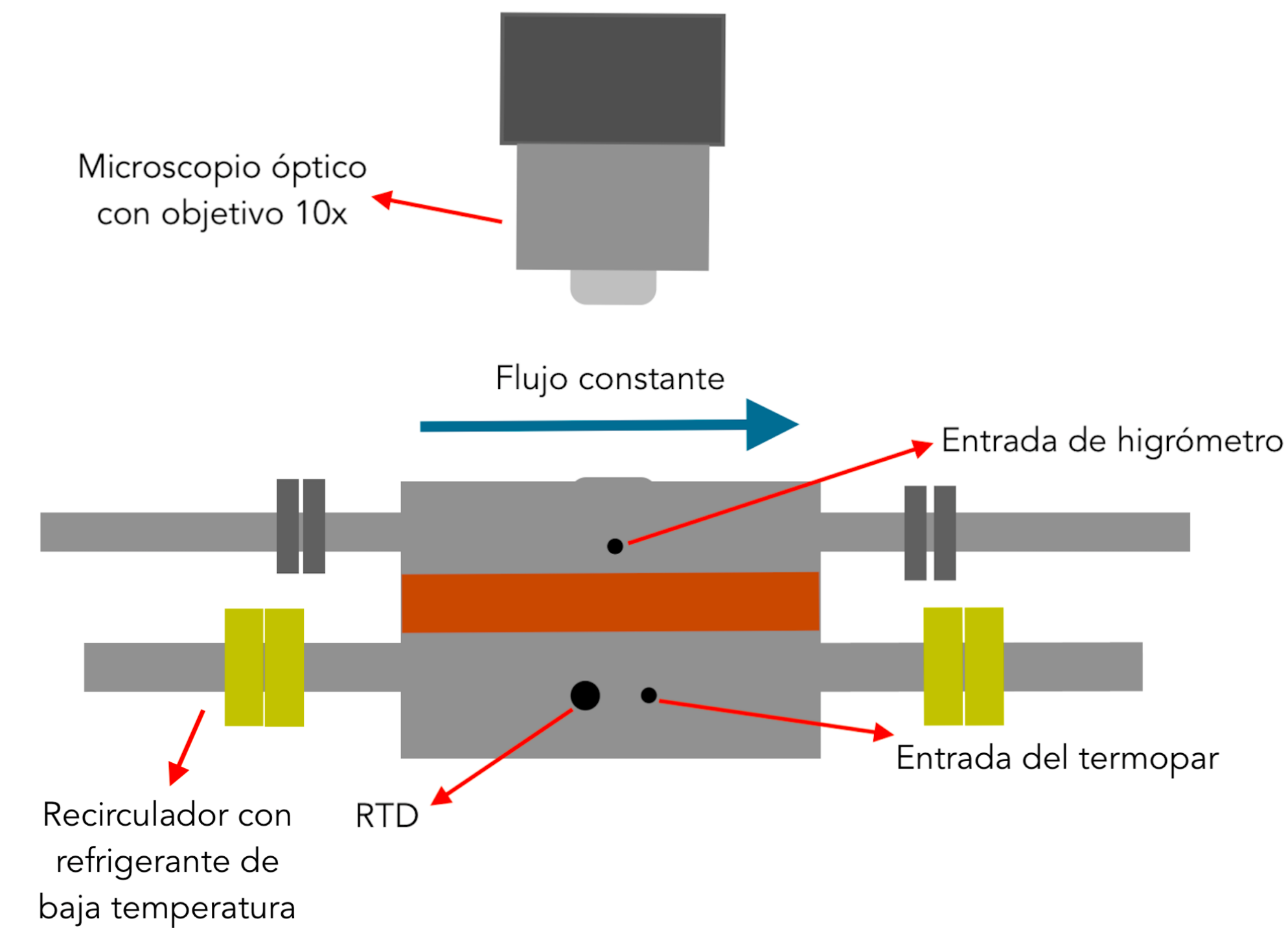


Figura 10. Esquema gráfico de la propuesta de construcción para la etapa fría de la UNAM-DFT.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA FRÍA

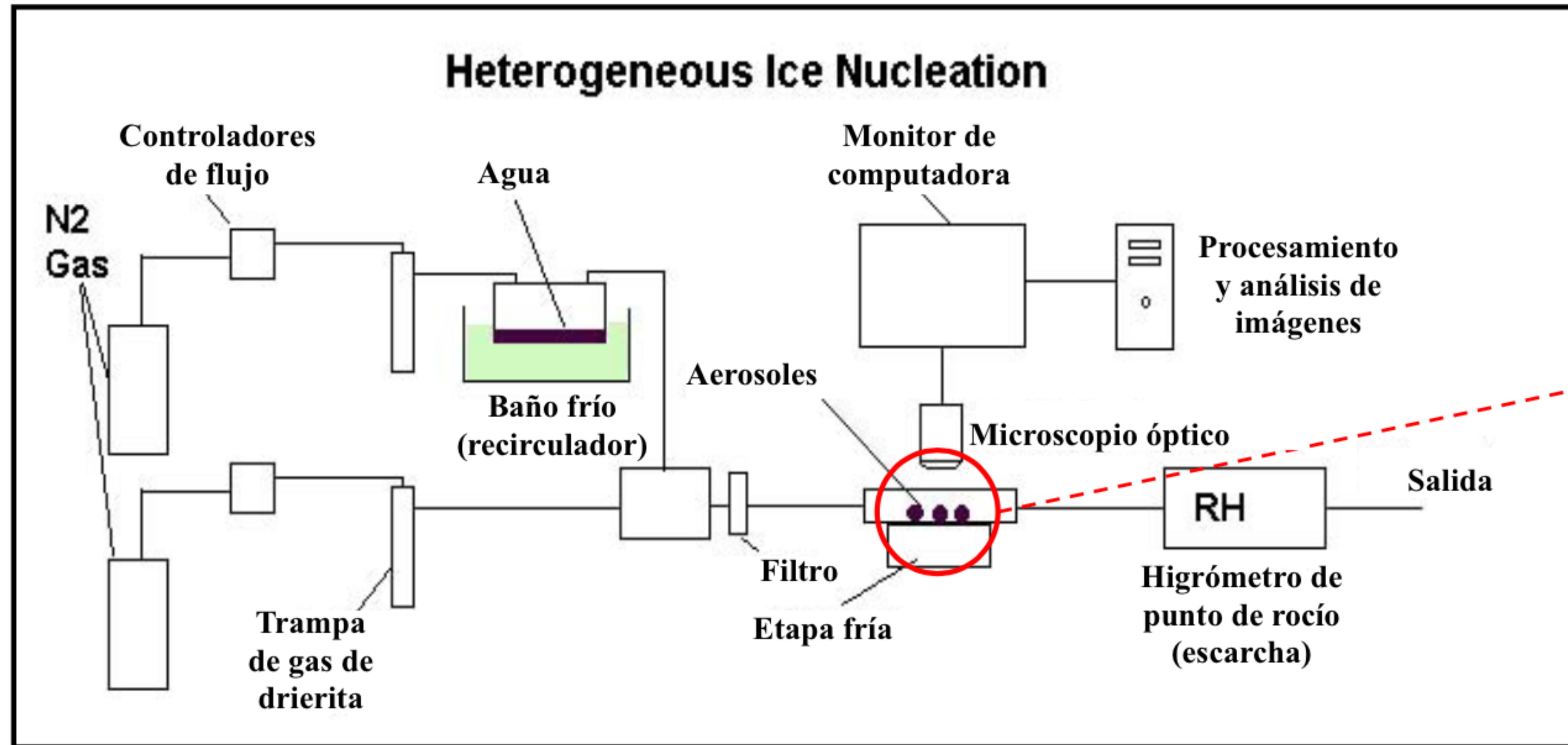


Figura 11. Componentes principales del HIN, ubicada en la Universidad de Xiamen, China.
Modificada de Wang et al. (2016).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA FRÍA

$$RH = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^0(T_d)}{p_{\text{H}_2\text{O}}^0(T_p)},$$

$$RH_{\text{ice}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^0(T_d)}{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ice}}(T_p)},$$

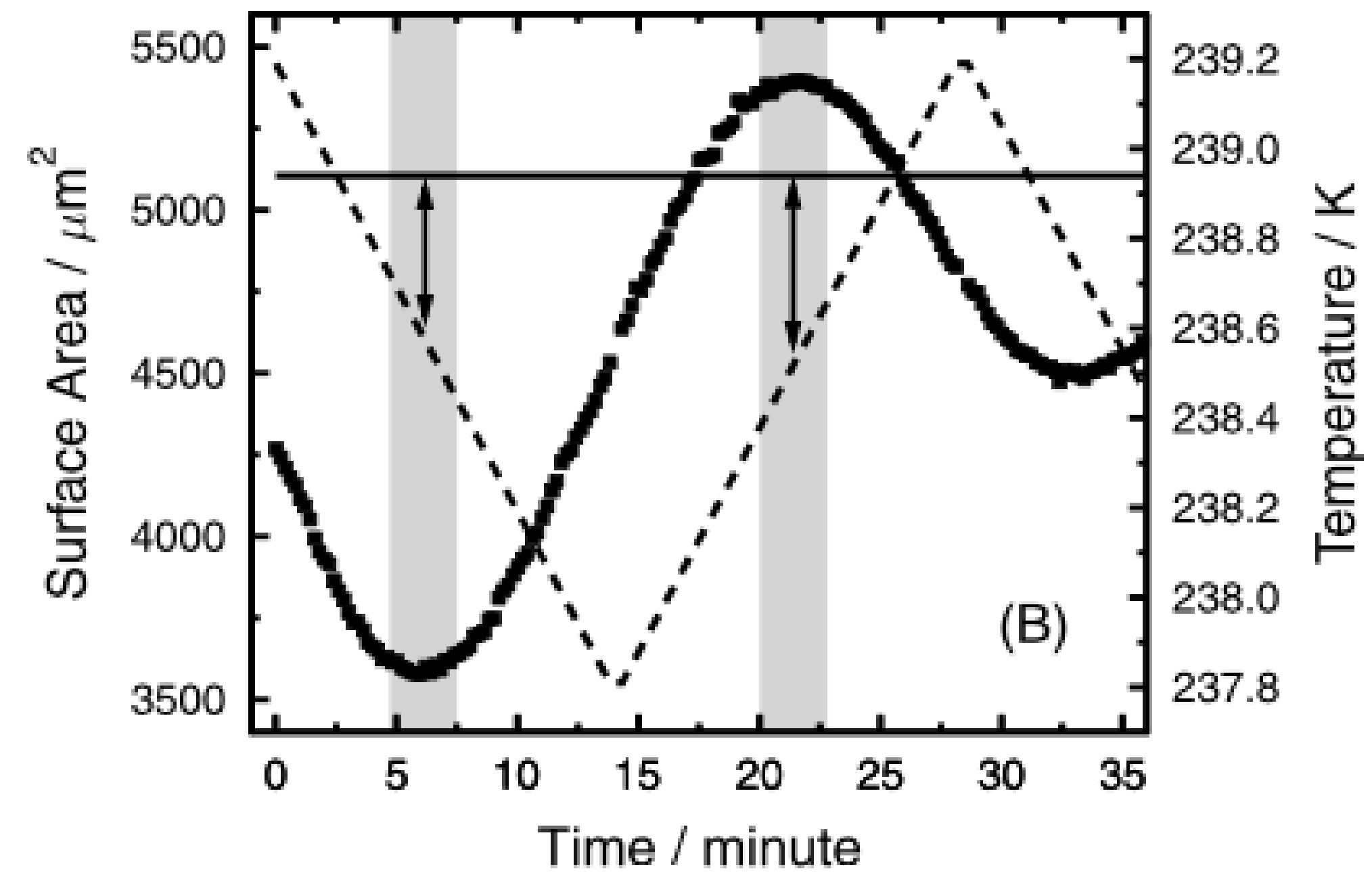
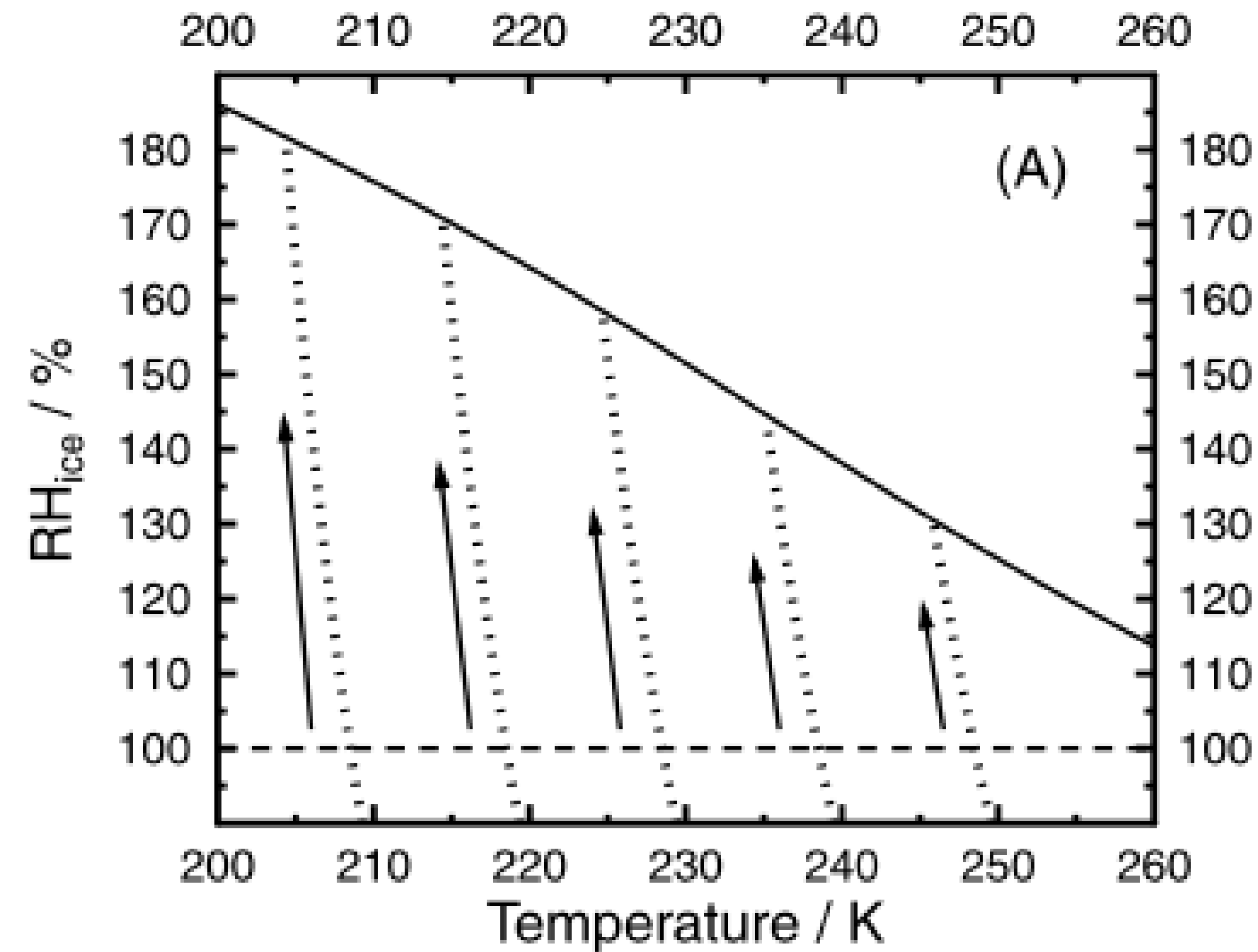


Figura 12. (A) Corridas típicas en la celda fría. (B) Experimento de calibración de T_d Tomada de Wang & Knopf (2011).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

NUCLEACIÓN DE PARTÍCULAS NATURALES

- Se analizó cualitativamente la composición química de las partículas recolectadas mediante un SEM.
- Se realizó la distribución de tamaños de las partículas de cada muestra.

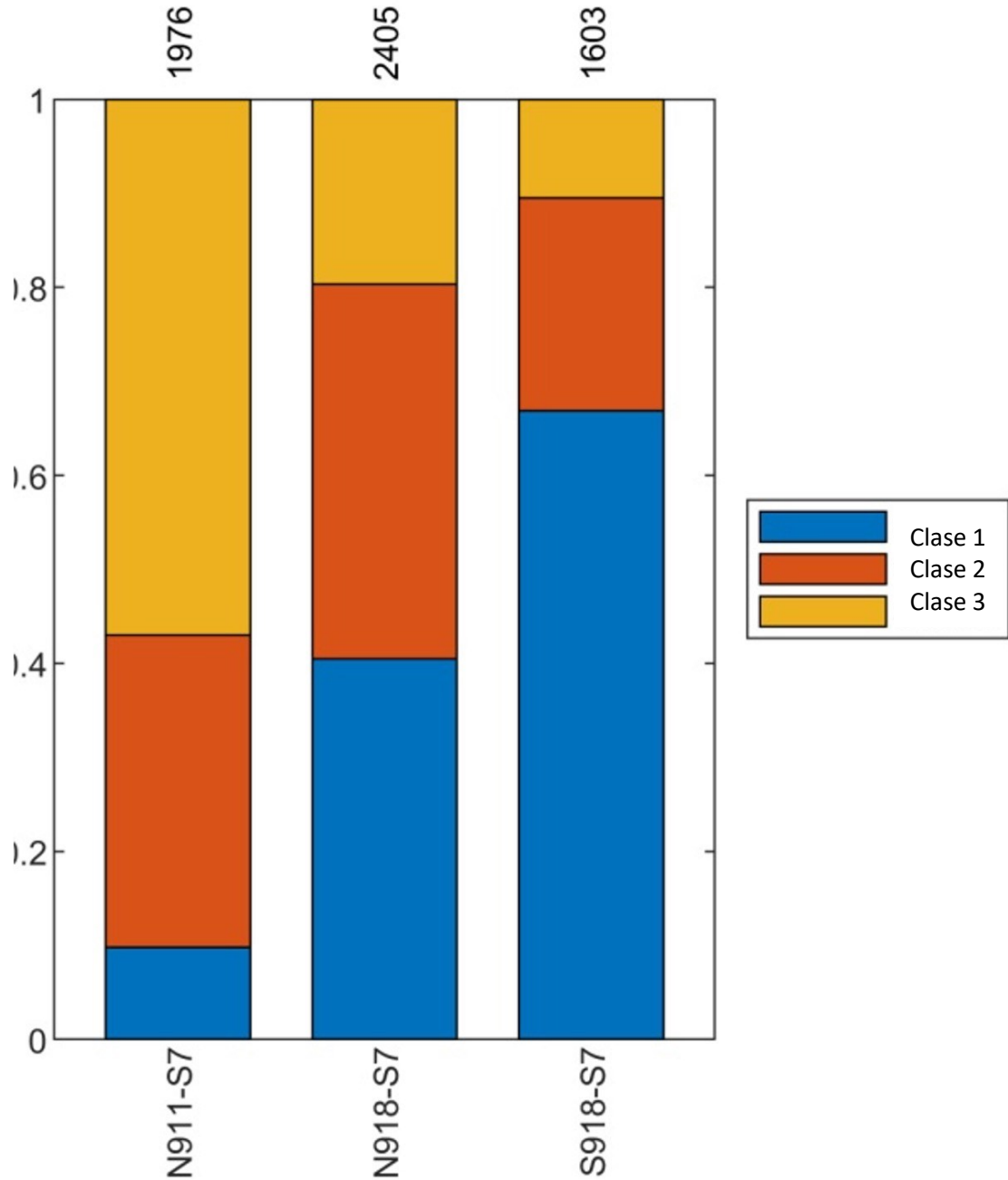
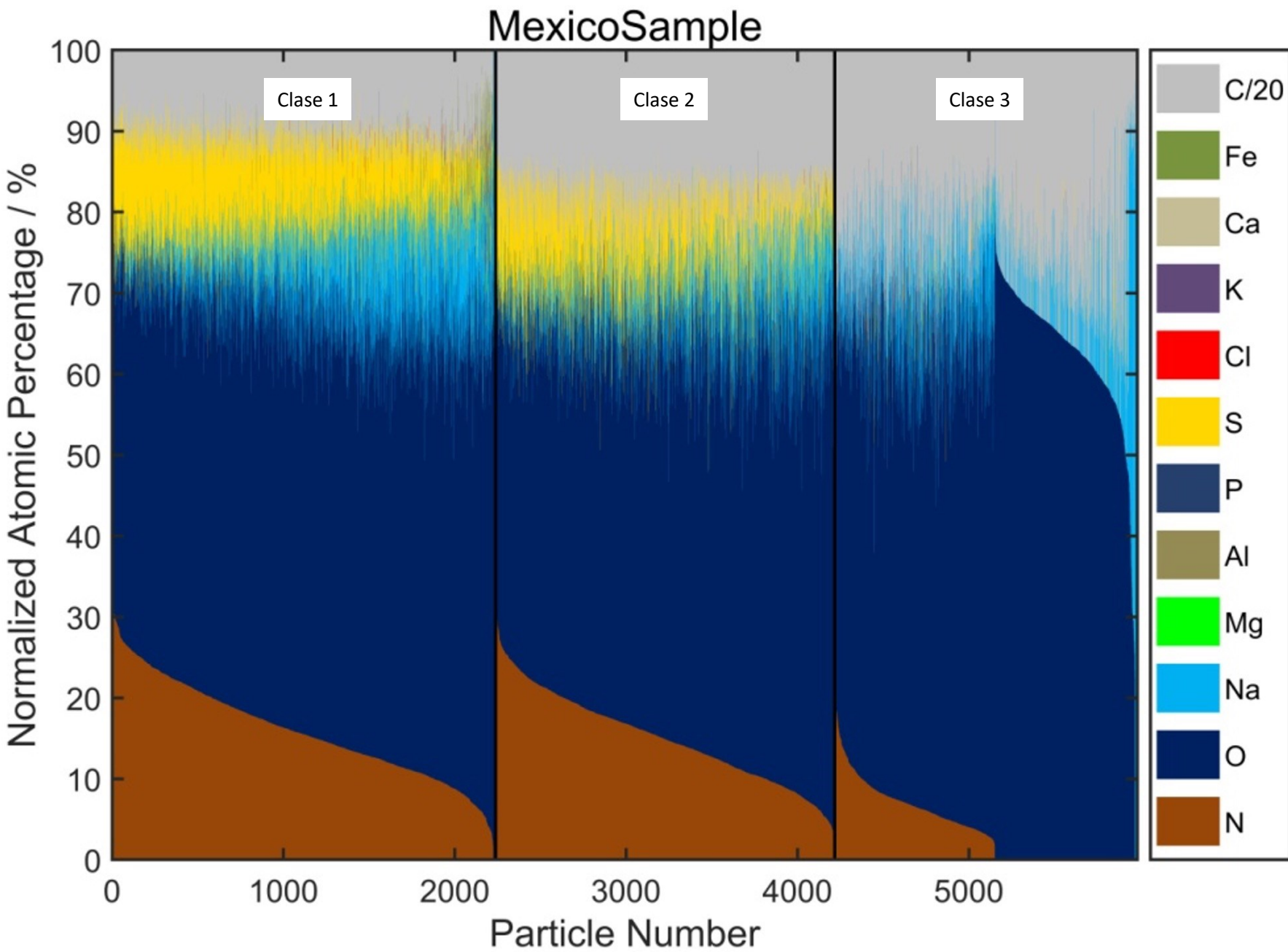
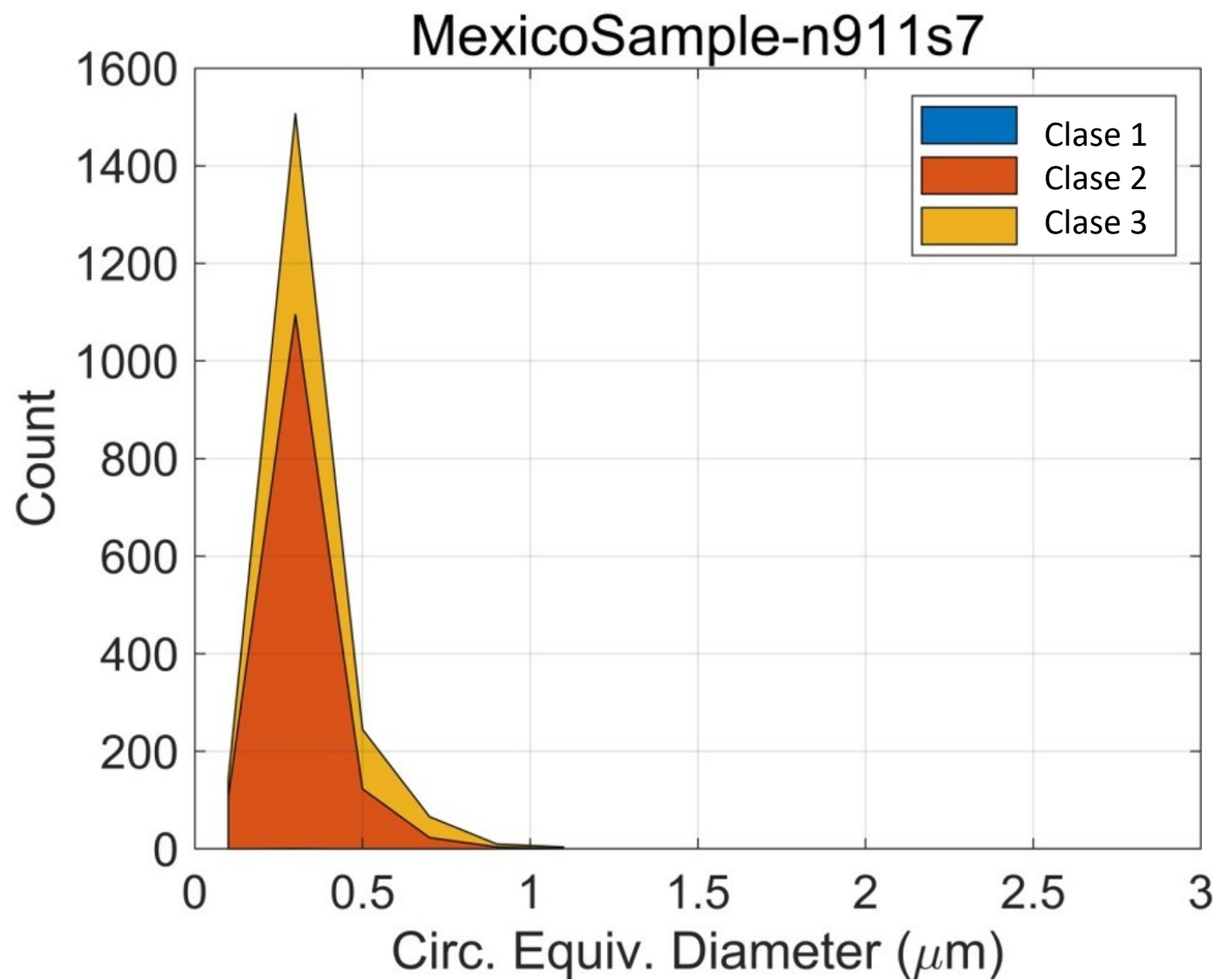


Figura 15. Distribución de tamaños (izquierda) y composición química (derecha) de partículas correspondientes a la etapa 7 (0.32-0.56 μm) del norte (izquierda y derecha) y sur (derecha) de la CDMX. Donde la clase 1 corresponde a polvo mineral con otros iones, y las clases 2 y 3 a diferentes clusters de carbono orgánico. Mendoza-Téllez et al. (en prep, 2025)

4. RESULTADOS PRELIMINARES

NUCLEACIÓN DE PARTÍCULAS NATURALES

- En 2022 sólo se pudieron analizar las habilidades como INPs de las partículas provenientes del sur de la CDMX.
- En donde se cuenta con un análisis completo que involucra calidad del aire, composición química e identificación de material biológico.

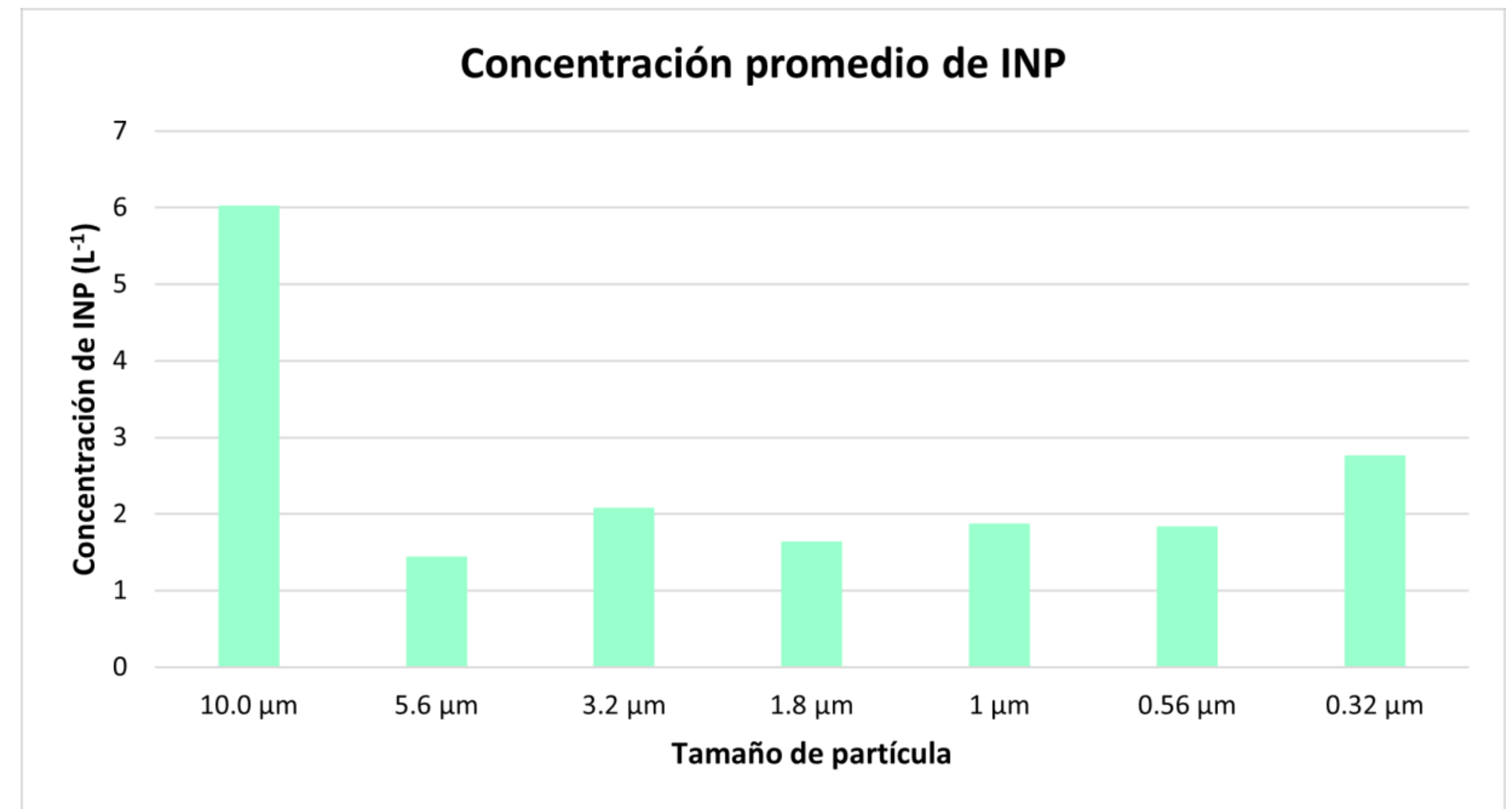
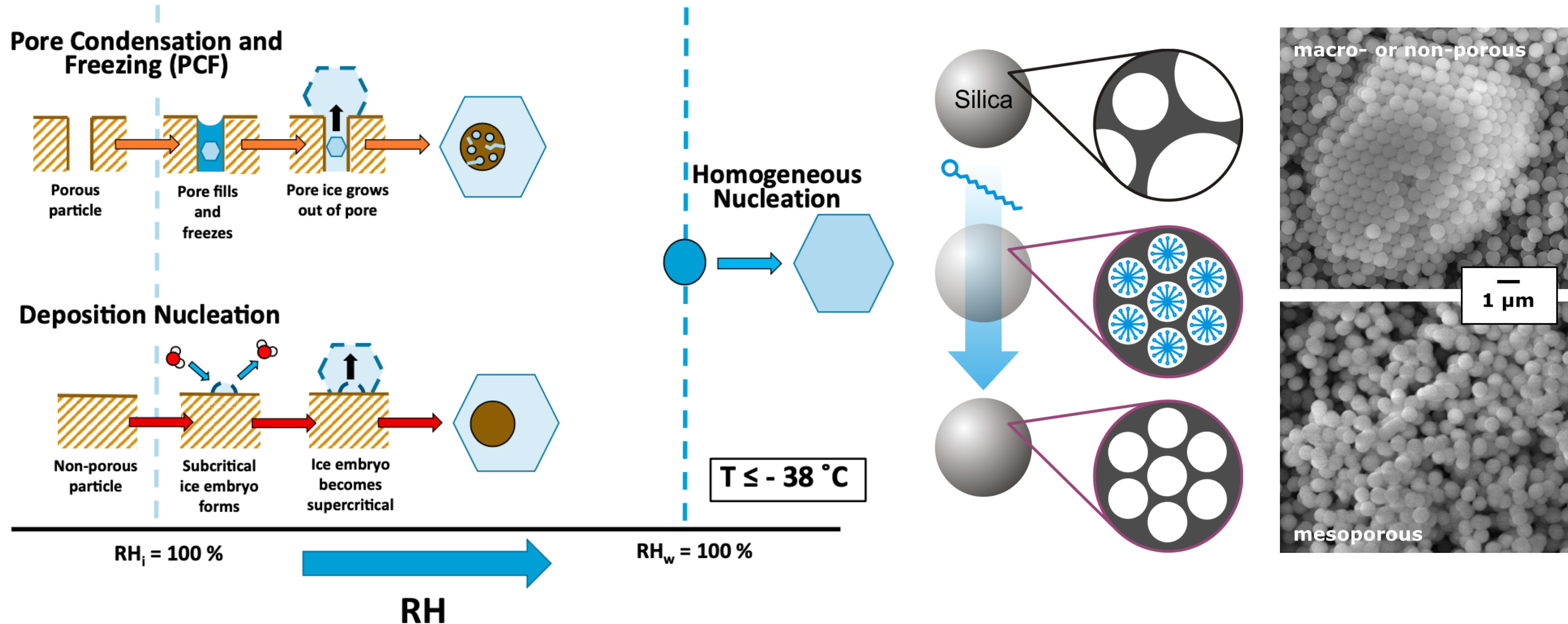


Figura 17. Concentración de INPs en función del tamaño de partícula de muestras recolectadas en el sur de la CDMX. Créditos: Karla Hernández.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

NUCLEACIÓN DE PARTÍCULAS SINTÉTICAS



5. AVANCE 2024-2

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN II

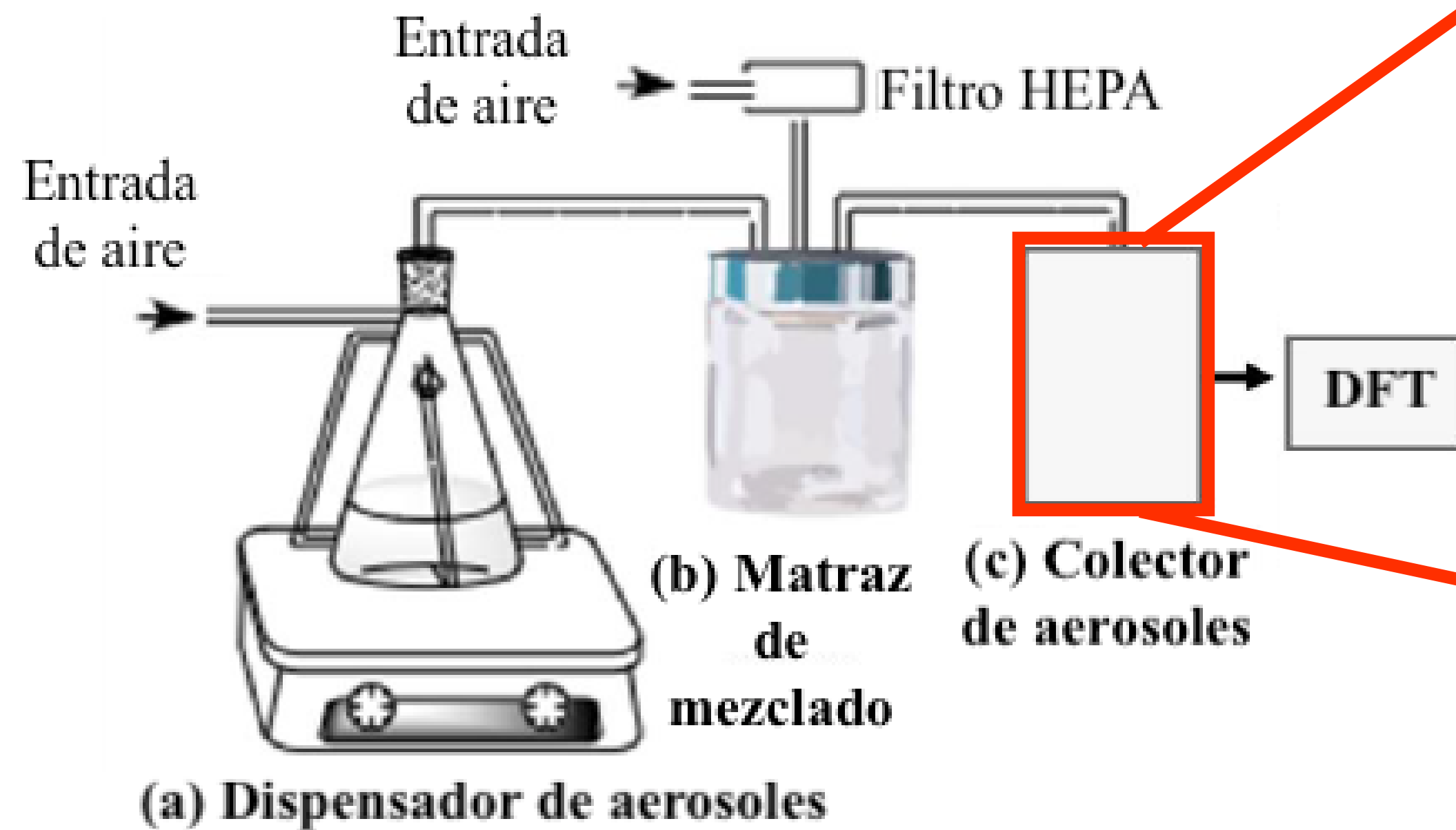


Figura 16. Configuración del sistema de generación de partículas de aerosol en seco. (a) dispensador de aerosoles, (b) matraz de mezclado, (c) colector de aerosoles (MOUDI). Modificado de Pereira et al. (2021).



Figura 21. Impactador de depósito uniforme con microorificios (MOUDI). Tomada de https://tsi.com/getmedia/771ace7e-bda8-4f34-87ed-6c872ea98deb/MSP_MOUDI_Impactors_MSP_PI-100_US-web?ext=.pdf.