



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL POLVO MINERAL PROVENIENTE DEL
DESIERTO DEL SAHARA EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

Q. MARÍA DE LOURDES MONTSERRAT SILVA CASTRO

ASESOR

DR. LUIS ANTONIO LADINO MORENO
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL POLVO MINERAL
PROVENIENTE DEL DESIERTO DEL SAHARA EN LA PENÍNSULA
DE YUCATÁN**

**T E S I S
PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS**

P R E S E N T A

Q. MARÍA DE LOURDES MONTSERRAT SILVA CASTRO



Ciudad de México, marzo 2023.

Jurado asignado

| | | |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Presidente | Dra. Ofelia Morton Bermea | Instituto de Geofísica, UNAM |
| Vocal | Dra. Águeda Elena Cenicerros Gómez | Facultad de Química, UNAM |
| Vocal | Dra. Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz | Facultad de Química, UNAM |
| Vocal | Dr. Oscar Augusto Peralta Rosales | ICAYCC, UNAM |
| Secretario | Dr. Harry Álvarez Ospina | Facultad de Ciencias, UNAM |

Este trabajo se desarrolló en el laboratorio del grupo de Interacción Micro y Mesoescala del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la supervisión del Dr. Luis Antonio Ladino Moreno.



Q. María de Lourdes Montserrat Silva Castro
Sustentante



Dr. Luis Antonio Ladino Moreno
Tutor

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas por permitirme continuar con mi formación y expandir mis horizontes.
- Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC) por el espacio y facilidades brindadas durante la realización de mi maestría. Y por otorgarme el premio al segundo lugar como mejor trabajo a nivel maestría en modalidad oral en el 1^{er} Congreso Estudiantil del ICAyCC.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada (CVU: 1100095), al apoyo financiero recibido de la beca PAPIIT IN111120 y la Fundación Marcos Moshinsky.
- A mi asesor el Dr. Luis Ladino por brindarme su apoyo, guía, paciencia y flexibilidad.
- Al M. en C. Daniel Rosas, Dr. Harry Álvarez, Dr. Bernardo Figueroa, Dr. Javier Morales, Dr. Jorge Uuh y Marco Pinto por su invaluable ayuda durante la campaña de recolección de muestras para la realización de este proyecto.
- A la Dra. Dara Salcedo, la Dra. Irma Rosas y el Dr. Harry Álvarez por el préstamo de equipos de recolección de muestras y monitoreo de material particulado.
- A la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y la Unidad Académica Sisal, del Instituto de Ingeniería (UNAM), por el uso de sus instalaciones durante la campaña de muestreo.
- Al M. en C. Daniel Rosas, Salett Novelo y Jessica Olivares de la UADY por su apoyo analítico con la técnica ICP-MS. A la Dra. Ofelia Morton y a la M. en C. Elizabeth Hernández del Instituto de Geofísica (UNAM) por su apoyo en la determinación de elementos mayores por ICP-MS. Al Dr. Javier Miranda del Instituto de Física (UNAM) por su apoyo con la técnica XRF. A la Dra. Teresa Pi Puig del Instituto de Geología (UNAM) por su apoyo en el análisis mineralógico por XRD. Al Dr. Harry Álvarez y a la Q. Isabel Saavedra del ICAyCC por su apoyo con la técnica IEC. A la Dra. Irma Gavilán de la Unidad

de Gestión Ambiental de la Facultad de Química (UNAM) por su ayuda con el secado de las muestras de suelo.

- Al Mtro. Alejandro Aguilar Sierra del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) por su colaboración en la obtención de imágenes satelitales.
- A los miembros del jurado, la Dra. Ofelia Morton, la Dra. Águeda Ceniceros, la Dra. Eugenia Gutiérrez, el Dr. Oscar Peralta y el Dr. Harry Álvarez, por la revisión del manuscrito, por sus comentarios y correcciones.
- Al grupo de Interacción Micro y Mesoescala, del cual la Dra. Graciela Raga es responsable, por abrir espacios de convivencia y divulgación.
- A Fernanda Córdoba, Pamela Martínez, Yenny Bonilla, Isabel Márquez y Karla Vivar por ofrecerme una mano amiga, por su acompañamiento, por todas las risas y sinceridad.

RESUMEN

El presente estudio busca identificar el transporte del polvo del Sahara a la península de Yucatán mediante el análisis de concentración de material particulado, variables meteorológicas, datos satelitales, y composición química y mineralógica de muestras partículas de aerosol y muestras de suelo.

Se realizó un muestreo de partículas de aerosol atmosférico en dos puntos en la península de Yucatán en el período del 4 al 24 de julio de 2021. Los sitios de muestreo fueron estratégicamente elegidos: el primero en la costa este, el punto de entrada de las partículas de aerosol transportadas por la masa de aire proveniente de África; y el segundo en la costa oeste donde la masa de aire continua su trayectoria luego de atravesar la península. De esta manera se puede hacer una comparación entre ambas costas, evaluando cómo se enriquece o como disminuyen las concentraciones de las especies analizadas por medio de diferentes técnicas analíticas. Se estudia cualitativamente que minerales se encuentran presentes en cada sitio. También se recolectaron muestras de suelo en tres puntos de la península. La evaluación de la composición química y mineralógica de las muestras de suelo permitió diferenciar entre las fuentes locales de emisión de partículas de aerosol y el transporte de polvo del Sahara. Además de estimar la influencia del depósito del polvo del Sahara en la formación del suelo.

La caracterización química de las muestras se llevó a cabo mediante las técnicas de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), fluorescencia de rayos X (XRF) y cromatografía de intercambio iónico (IEC), la caracterización mineralógica se llevó a cabo por difracción de rayos X (XRD). Durante el periodo de muestreo se monitoreó en tiempo real la concentración másica del material particulado, se recabaron datos satelitales, datos meteorológicos en superficie y en perfil vertical para identificar las intrusiones de polvo del Sahara.

Se lograron identificar exitosamente tres intrusiones de polvo del Sahara en la península de Yucatán entre el 4 y el 24 de julio de 2021. Durante estas intrusiones de polvo del Sahara se observó un incremento en la concentración másica de PM₁₀

en ambas costas, alcanzando un máximo de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$; a la par que se detectó un incremento de la mayoría de las especies químicas analizadas. Se identificó un efecto de dilución, ya que se observó una disminución en la concentración de las especies químicas analizadas en las muestras de aerosol que contenían polvo del Sahara, siendo la costa este de la península la que presentó una mayor influencia de las masas de aire provenientes de África. Los resultados sugieren que las partículas de aerosol muestreadas no poseen una contribución importante de partículas re-suspendidas de suelo. Finalmente, la composición química y mineralógica de las muestras de suelo muestra la influencia del depósito anual de partículas de polvo africano en la península de Yucatán.

INTRODUCCIÓN

A nivel global las fuentes naturales generan una mayor cantidad de partículas de aerosol comparado con las fuentes antropogénicas, la segunda fuente más importante son los desiertos, que emiten polvo mineral a la atmósfera. Hasta un 70% de las emisiones de polvo mineral se originan en el norte de África donde se sitúa el desierto del Sahara. Existen varios estudios que demuestran que el polvo mineral del Sahara puede ser transportado a otros lugares a favor del viento. Durante el verano, en el hemisferio norte, este polvo mineral es transportado sobre el océano Atlántico Norte y el mar Caribe. Donde el pico máximo de concentración de polvo del Sahara que es transportado ocurre en julio, y puede llegar incluso hasta la península de Yucatán.

Las partículas de polvo mineral pueden afectar el sistema climático de diferentes formas, pueden alterar el balance radiativo de la Tierra, contribuyen a la formación de nubes de fase mixta, pueden interferir en los ciclos biogeoquímicos, ser acarreadores de nutrientes, partículas biológicas y fragmentos de ellas, afectar la visibilidad y la salud humana. Estos efectos pueden observarse localmente y en lugares lejanos a la fuente de emisión debido a su transporte. Además, durante este transporte una fracción de estas partículas puede depositarse sobre la superficie terrestre, interviniendo en la formación de suelos.

Hasta la fecha, se han realizado pocos estudios experimentales durante la llegada del polvo del Sahara a la península de Yucatán (Córdoba et al., 2021; Raga et al., 2021; Ramírez-Romero et al., 2021). Estos estudios introducen la presencia del polvo africano en la península, y su impacto en la concentración y variabilidad de núcleos de glaciación de hielo (INPs), esenciales para la formación de nubes de fase mixta. Sin embargo, los muestreos fueron realizados en Mérida, un sitio alejado de la costa este, el punto de entrada del polvo del Sahara. Por lo que las emisiones locales y la posible re-suspensión de suelo de la península de Yucatán pueden influir en la composición química y en las propiedades de las partículas de aerosol recolectadas. Este estudio pretende esclarecer las posibles fuentes de incertidumbre halladas en los resultados de los análisis reportados previamente,

aportar información novedosa sobre la composición química y mineralógica de las partículas de aerosol con una influencia de polvo del Sahara y de los suelos de la península. Dado que el transporte de polvo del Sahara ocurre anualmente, desde hace miles de años, es de vital importancia ampliar el conocimiento sobre el impacto del polvo del Sahara en la región.

El escrito se divide en diferentes secciones: marco teórico, metodología, resultados y discusión, conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, socialización de resultados en congresos, referencia y anexos. En el marco teórico se introduce al lector con conceptos útiles para el entendimiento del estudio, y se habla de la motivación, la hipótesis y los objetivos. Posteriormente en la metodología se detallan las características de los sitios de muestreo, de los equipos de muestreo y de las técnicas de análisis químicos y mineralógico empleadas, así como sobre la obtención de los datos meteorológicos utilizados. La sección de resultados y discusión se subdivide en una perspectiva general de las series de tiempo de la concentración de material particulado y las variables meteorológicas monitoreadas durante la campaña de muestreo; seguido de la identificación de las posibles intrusiones de polvo del Sahara y los resultados de la composición química de las muestras de partículas de aerosol; posteriormente se comparan las muestras de aerosol con influencia de polvo del Sahara y sin ella; luego se reportan la composición química y mineralógica de los suelos de la península; y finalmente se discute acerca de la posible contribución de la re-suspensión de suelo en las muestras de aerosol. En los anexos se adjuntan los difractogramas obtenidos de las muestras de aerosol, ejemplos del rastreo de plumas de polvo del Sahara por medio de imágenes satelitales y algunas retro-trayectorias calculadas en ambos sitios de muestreo de aerosol, antes y después de cada intrusión de polvo del Sahara.

Índice

Índice de figuras

Índice de tablas

Lista de abreviaturas

| | |
|--|----------|
| 1. Marco teórico | 1 |
| 1.1. Aerosol atmosférico | 1 |
| 1.1.1. Clasificación por tamaño | 1 |
| 1.1.2. Partículas primarias y secundarias | 3 |
| 1.1.3. Fuentes del aerosol atmosférico | 5 |
| 1.1.4. Composición química | 7 |
| 1.1.5. Efectos en el sistema climático | 10 |
| 1.1.5.1. Efecto directo..... | 10 |
| 1.1.5.2. Efecto indirecto | 11 |
| 1.1.6. Mecanismos de eliminación | 12 |
| 1.2. Polvo mineral del desierto del Sahara | 13 |
| 1.2.1. Propiedades químicas y mineralógicas | 14 |
| 1.2.2. Transporte..... | 14 |
| 1.2.3. Estudios previos en México..... | 16 |
| 1.3. Polvo mineral proveniente de suelos | 19 |
| 1.3.1. Formación del suelo | 20 |
| 1.3.2. Los suelos de la península de Yucatán | 22 |
| 1.4. Motivación | 23 |
| 1.5. Hipótesis..... | 24 |
| 1.6. Objetivos | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 1.6.1. General | 24 |
| 1.6.2. Específicos..... | 24 |
| 2. Metodología..... | 26 |
| 2.1. Muestreo | 26 |
| 2.1.1. Descripción de los sitios de muestreo | 27 |
| 2.1.1.1. Cozumel, Quintana Roo..... | 27 |
| 2.1.1.2. Sisal, Yucatán..... | 28 |
| 2.1.1.3. Reserva Ecológica Estatal El Palmar, Yucatán..... | 29 |
| 2.1.1.4. Hunucmá, Yucatán | 30 |
| 2.1.2. Equipos..... | 30 |
| 2.1.2.1. Muestras de partículas de aerosol | 30 |
| 2.1.2.3. Muestras de suelo | 32 |
| 2.1.2.4. Monitoreo de partículas de aerosol..... | 36 |
| 2.2. Datos meteorológicos | 36 |
| 2.2.1. Estaciones meteorológicas | 36 |
| 2.2.2. Radiosondeo atmosférico..... | 37 |
| 2.2.3. Modelo HYSPLIT | 37 |
| 2.2.4. Imágenes satelitales | 37 |
| 2.3. Análisis químico..... | 38 |
| 2.3.1. Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) | 38 |
| 2.3.2. Fluorescencia de rayos X (XRF) | 40 |
| 2.3.3. Difracción de rayos X (XRD) | 41 |
| 2.3.4. Cromatografía de intercambio iónico (IEC)..... | 43 |
| 3. Resultados y discusión | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1. Series de tiempo..... | 45 |
| 3.2. Identificación de las intrusiones de polvo del Sahara..... | 49 |
| 3.3. Composición química de las partículas de aerosol atmosférico | 55 |
| 3.4. Comparación entre las muestras con posibles intrusiones de polvo del Sahara y de fondo..... | 62 |
| 3.5. Composición química y mineralógica del suelo..... | 68 |
| 3.6. Re-suspensión de suelo | 72 |
| 4. Conclusiones | 76 |
| 5. Recomendaciones y perspectivas a futuro..... | 78 |
| 6. Socialización de resultados en Congresos..... | 79 |
| 7. Referencias..... | 80 |
| Anexo A | 87 |
| Anexo B | 88 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribución del número de partículas respecto a su tamaño..... | 3 |
| Figura 2. a) Profundidad Óptica del Aerosoles (AOD) para el 2010. b) Distribución del aerosol proveniente de diferentes fuentes..... | 7 |
| Figura 3. Distribución porcentual de compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y carbono elemental en ejemplos de partículas provenientes de distintos entornos..... | 8 |
| Figura 4. Efecto directo de las partículas de aerosol..... | 11 |
| Figura 5. Mecanismos de eliminación de partículas de aerosol atmosférico..... | 13 |
| Figura 6. Imagen satelital de una columna de polvo del Sahara atravesando el Océano Atlántico del Norte captada por el Satélite GOES East el 27 de junio de 2018..... | 16 |
| Figura 7. Concentración másica de PM _{2.5} y PM ₁₀ en a) 2017 y b) 2018. Y composición química elemental porcentual obtenida por XRF..... | 17 |
| Figura 8. Promedio mensual de junio a septiembre de la concentración de PM ₁₀ asociada con el polvo mineral..... | 19 |
| Figura 9. Perfil horizontal del suelo: (1) Horizonte A, (2) Horizonte B, (3) Horizonte C, (4) Roca madre..... | 21 |
| Figura 10. Zonas kársticas en México..... | 23 |
| Figura 11. Sitios de muestreo en la península de Yucatán: muestreo de aerosol atmosférico (A1, A2) y muestreo de suelos (S1, S2 y S3) | 27 |
| Figura 12. Vista de la instalación de equipos en Sisal, Yucatán..... | 29 |
| Figura 13. Muestreador de alto volumen Hi-Vol PM ₁₀ | 31 |
| Figura 14. División de filtros de celulosa..... | 32 |
| Figura 15. Tamiz de latón Cole-Parmer (YV-59980-10) y muestra de suelo..... | 33 |
| Figura 16. Sistema de generación de aerosol en seco y equipos de muestreo de partículas de aerosol: a) MiniVol y b) MOUDI..... | 34 |
| Figura 17. DustTrak..... | 36 |
| Figura 18. Difractómetro Empyrean, con detector PIXcel 3D..... | 43 |
| Figura 19. Cromatógrafo Dionex ICS-1500..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Series de tiempo de (a) temperatura, (b) humedad relativa, (c) velocidad del viento y (d) presión atmosférica en superficie, para A1 (Cozumel)..... | 46 |
| Figura 21. Serie de tiempo de PM ₁₀ para A1 (Cozumel)..... | 46 |
| Figura 22. Series de tiempo de (a) temperatura, (b) humedad relativa, (c) velocidad del viento y (d) presión atmosférica en superficie, para A2 (Sisal)..... | 48 |
| Figura 23. Serie de tiempo de PM ₁₀ para A2 (Sisal)..... | 48 |
| Figura 24. Coeficientes de correlación de Spearman entre las series de tiempo de concentración másica de PM ₁₀ y las variables meteorológicas analizadas..... | 51 |
| Figura 25. Imágenes del satélite GOES-16 a color real del: (a) 10/07/21 a las 12:00 p.m. (b) 14/07/21 a las 07:00 p.m., (c) 23/07/21 a las 01:00 p.m. y 13/07/21 a las 01:00 p.m..... | 52 |
| Figura 26. Retro-trayectorias calculadas para las tres intrusiones de polvo del Sahara: (a) 10/07/2021 a las 12:00 p.m., (b) 15/07/2021 a las 12:00 a.m. y (c) 23/07/2021 a las 12:00 a.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio..... | 53 |
| Figura 27. Promedio de radiosondeos para los días registrados con intrusiones de polvo del Sahara (verde) y días con concentración de fondo (azul) en Cancún.... | 55 |
| Figura 28. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos huella de polvo mineral en A1 (Cozumel), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)..... | 56 |
| Figura 29. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos huella de polvo mineral en A2 (Sisal), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)..... | 57 |
| Figura 30. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos traza en A1 (Cozumel), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)..... | 58 |
| Figura 31. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos traza en A2 (Sisal), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)..... | 58 |
| Figura 32. Diagrama de caja y bigotes de composición química en A1 (Cozumel), obtenida por fluorescencia de rayos X (XRF)..... | 59 |
| Figura 33. Diagrama de caja y bigotes de composición química en A2 (Sisal), obtenida por fluorescencia de rayos X (XRF)..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 34. Diagrama de caja y bigotes de iones solubles en A1 (Cozumel), obtenido por cromatografía de intercambio iónico (IEC)..... | 61 |
| Figura 35. Diagrama de caja y bigotes de iones solubles en A2 (Sisal), obtenido por cromatografía de intercambio iónico (IEC)..... | 61 |
| Figura 36. Coeficientes de correlación de Spearman entre las series de tiempo de concentración másica de PM ₁₀ y las especies químicas analizadas por (a) ICP-MS, (b) XRF y (c) IEC..... | 63 |
| Figura 37. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los elementos huella de polvo mineral analizados por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)..... | 66 |
| Figura 38. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los elementos menores y traza analizados por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)..... | 67 |
| Figura 39. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los elementos analizados por fluorescencia de rayos X (XRF) en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)..... | 67 |
| Figura 40. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los iones solubles analizados por cromatografía de intercambio iónico (IEC) en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)..... | 68 |
| Figura 41. Concentración porcentual de elementos huella de polvo mineral de las muestras de suelo de S1 (Cozumel) y S2 (El Palmar), analizadas por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)..... | 69 |
| Figura 42. Composición elemental porcentual de las muestras de suelo de S1 (Cozumel), S2 (El Palmar) y S3 (Hunucmá), analizadas por fluorescencia de rayos X (XRF)..... | 70 |
| Figura 43. Composición mineralógica porcentual de las muestras de suelo de S1 (Cozumel), S2 (El Palmar) y S3 (Hunucmá), analizadas por difracción de rayos X (XRD)..... | 72 |
| Figura 44. Relaciones de concentración Elemento/Al obtenidas mediante la técnica XRF, para las muestras de aerosol relacionadas con intrusiones de polvo del Sahara, muestras de aerosol de fondo y la muestra de suelo de la costa este de la península de Yucatán..... | 74 |
| Figura 44. Relaciones de concentración Elemento/Al obtenidas mediante la técnica XRF, para las muestras de aerosol relacionadas con intrusiones de polvo del Sahara, muestras de aerosol de fondo y la muestra de suelo de la costa oeste de la península de Yucatán..... | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura A. Difractograma comparativo de las muestras con polvo del Sahara y de fondo extraídas con metanol para Cozumel (A1)..... | 87 |
| Figura B. Difractograma comparativo de las muestras con polvo del Sahara y de fondo extraídas con metanol para Sisal (A2)..... | 87 |
| Figura C. Seguimiento por imágenes del satélite GOES-16 a color real de las plumas de polvo del Sahara observadas el 10/07/2021..... | 88 |
| Figura D. Seguimiento por imágenes del satélite GOES-16 a color real de la pluma de polvo del Sahara observada el 14/07/2021..... | 89 |
| Figura E. Seguimiento por imágenes del satélite GOES-16 a color real de la pluma de polvo del Sahara observada el 19/07/2021..... | 89 |
| Figura F. Retro-trayectorias calculadas para: (a) 08/07/2021 a las 12:00 p.m. y (b) 13/07/2021 a las 12:00 a.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio..... | 90 |
| Figura G. Retro-trayectorias calculadas para: (a) 14/07/2021 a las 12:00 p.m. y (b) 17/07/2021 a las 12:00 p.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio..... | 91 |
| Figura H. Retro-trayectorias calculadas para: (a) 22/07/2021 a las 12:00 p.m. y (b) 24/07/2021 a las 12:00 a.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio..... | 92 |
| Figura I. Retro-trayectorias calculadas para el 19/07/2021 a las 12:00 a.m., el lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio..... | 93 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Diferentes modos de partículas de aerosol de acuerdo con su tamaño.... | 2 |
| Tabla 2. Rangos de tamaño de cada etapa del MOUDI | 35 |
| Tabla 3. Mezclas preparadas para la extracción del material particulado previo al análisis por XRD..... | 42 |
| Tabla 4. Percentiles 75 y 25 calculados para A1 (Cozumel) y A2 (Sisal) durante la campaña de mediciones de julio de 2021..... | 49 |
| Tabla 5. Concentración másica promedio de PM10 para 24 horas en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal). Naranja: intrusiones de polvo del Sahara. Amarillo: concentración de fondo..... | 50 |

Lista de abreviaturas

| | |
|-----------|---|
| ACSM | Aerosol Chemical Speciation Monitor |
| AMS | Aerosol Mass Spectrometer |
| AOD | Aerosol Optical Depth |
| AWC | Aviation Weather Center |
| CAMS | Copernicus Atmosphere Monitoring Service |
| CCN | Núcleo de condensación de nube |
| d_a | Diámetro aerodinámico |
| DIGAOHM | Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología |
| DMS | Sulfato de dimetilo |
| EC | Carbón elemental |
| ECHAM–HAM | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Hamburg – Hamburg Aerosol Module |
| EMAS | Estaciones meteorológicas automáticas |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| GFS | Global Forecast System |
| GOES | Geostationary Operational Environmental Satellite |
| HAP | Hydrocarburos aromáticos policíclicos |
| HEPA | High efficiency particulate air |
| HYSPLIT | Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory |
| ICP-MS | Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente |
| IEC | Cromatografía de intercambio iónico |

| | |
|-------------------|--|
| INAFED | Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística y Geografía |
| INP | Núcleo de glaciación |
| MOUDI | Micro Orifice Uniform Deposit Impactor |
| LANOT | Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra |
| NCEI | National Centers for Environmental Information |
| n^e_N | Número de partículas normalizado |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| NO _x | Óxidos de nitrógeno |
| PM _{1.0} | Material particulado menor a 1.0 μm |
| PM _{2.5} | Material particulado menor a 2.5 μm |
| PM ₁₀ | Material particulado menor a 10 μm |
| PST | Partículas suspendidas totales |
| Q | Cuadrupolo |
| r_a | Radio aerodinámico |
| RF | Forzamiento radiativo |
| RH | Humedad relativa |
| RH _a | Humedad relativa respecto al agua |
| RH _i | Humedad relativa respecto al hielo |
| RUOA | Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos |
| SAL | Capa de Aire Sahariana |
| SEMAR | Secretaría de Marina |
| SNIM | Sistema Nacional de Información Municipal |

| | |
|-----------------|---|
| SOA | Aerosol orgánico secundario |
| SO _x | Óxidos de azufre |
| TOA | Parte superior de la atmósfera |
| TOF | Tiempo de vuelo |
| UADY | Universidad Autónoma de Yucatán |
| UAS | Unidad Académica Sisal |
| UV | Ultravioleta |
| UNAM | Universidad Nacional Autónoma de México |
| UTC | Tiempo universal coordinado |
| XRD | Difracción de rayos X |
| XRF | Fluorescencia de rayos X |

1. Marco teórico

1.1. Aerosol atmosférico

El aerosol atmosférico está definido como el conjunto de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, excluyendo a los hidrometeoros, por ejemplo, gotas de lluvia, nieve, granizo (Lohmann et al., 2016). Por convención, cuando se habla de aerosol atmosférico se hace referencia sólo a la fase dispersa (las partículas sólidas y líquidas), aunque la definición también incluya al medio gaseoso. Altas concentraciones de partículas de aerosol tienen un impacto en la calidad del aire, reflejado en una disminución de la visibilidad y efectos adversos en la salud, este último sobre todo debido a partículas finas (p.ej., Buseck & Schwartz, 2013). En las siguientes secciones se describirán aspectos importantes del aerosol atmosférico como la clasificación por tamaño, fuentes, formación de partículas primarias y secundarias, mecanismos de eliminación, propiedades fisicoquímicas generales; así como su interacción con la radiación y las nubes.

1.1.1. Clasificación por tamaño

Una de las clasificaciones más importantes de las partículas de aerosol atmosférico se basa en su tamaño. Debido a que las partículas de aerosol no poseen una forma definida no es fácil clasificarlas, por ello se utiliza un valor equivalente conocido como el diámetro aerodinámico (d_a). El d_a se define como el diámetro de una esfera con densidad unitaria ($\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$) que tiene la misma velocidad de sedimentación en aire en calma que la partícula en cuestión, bajo las mismas condiciones de temperatura, presión atmosférica, y humedad relativa (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Friedlander, 2000). A partir de este diámetro se ordena a las partículas de aerosol en diferentes modos, como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Diferentes modos de partículas de aerosol de acuerdo con su tamaño (Lohmann et al., 2016).

| Modo | d_a |
|---------------------|----------------------------|
| Nucleación | 0.001 – 0.01 μm |
| Aitken | 0.01 – 0.1 μm |
| Acumulación | 0.1 – 1.0 μm |
| Grueso | 1.0 – 10.0 μm |
| Partículas gigantes | > 10.0 μm |

Las partículas de aerosol también pueden clasificarse de acuerdo con su tamaño como partículas finas, ultrafinas y gruesas. Se definen como partículas gruesas a aquellas partículas de aerosol que poseen un tamaño menor a 10.0 μm (PM₁₀), finas si tienen un diámetro menor a 2.5 μm (PM_{2.5}) y ultrafinas si es menor a 0.1 μm (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999).

Ya que el tamaño de las partículas de aerosol juega un rol importante en su interacción con la atmósfera, es importante conocer la forma en la que se encuentran distribuidas por tamaños. Una de las distribuciones por tamaño más utilizadas es la dada por el número de partículas. Ésta se representa a través de un gráfico del número de partículas normalizado en función del diámetro o radio aerodinámico (r_a). Se utiliza el número de partículas normalizado (n^e_N) para poder observar mejor la distribución. n^e_N representa la concentración numérica de partículas alrededor de un intervalo de radios en escala logarítmica (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Lohmann et al., 2016). En la **Figura 1** se puede observar que las partículas más abundantes en la atmósfera son las que se encuentran en el modo de acumulación y nucleación, mientras que las partículas gruesas y gigantes se encuentran en menor concentración. Más adelante se hablará sobre la relación entre el tamaño de las partículas de aerosol con sus fuentes de origen, mecanismos de formación y la forma en que permanecen o se eliminan de la atmósfera.

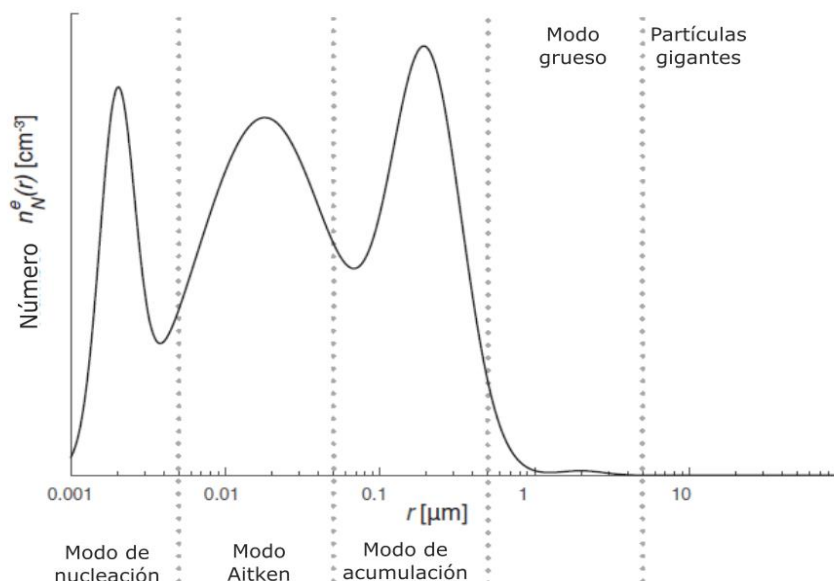


Figura 1. Distribución del número de partículas respecto a su tamaño (Modificada de Lohmann et al., 2016).

1.1.2. Partículas primarias y secundarias

De acuerdo con el mecanismo de formación, las partículas de aerosol se pueden clasificar como primarias o secundarias. Las partículas primarias son aquellas que se emiten directamente desde su fuente a la atmósfera, ya sean sólidas o líquidas. Éstas se pueden generar a través de la conversión de cúmulo a partícula (bulk-to-particle), gracias a diferentes factores climáticos como la velocidad del viento, la temperatura, humedad y la vegetación que propician la liberación de partículas a partir del material base (Lohmann et al., 2016; Tomasi, 2017; Tegen & Schepanski, 2018). La conversión bulk-to-particle conduce a la producción de: (i) partículas de polvo mineral con la corteza terrestre como material base, (ii) sales marinas a partir de los océanos y (iii) partículas biológicas cuando el material base es proporcionado por plantas (principalmente fragmentos o desechos de plantas y polen) y animales (Tomasi et al., 2017).

Por otro lado, las partículas secundarias son el resultado de la generación de una nueva fase (líquida o sólida) y se forman dentro de la atmósfera por medio de reacciones químicas a partir de sustancias precursoras y/o diferentes procesos

físicos (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999). El mecanismo más importante de formación de partículas secundarias es la conversión de gas a partícula (gas-to-particle), donde la condensación vapores conduce a la nucleación de nuevas partículas. Para formar la nueva partícula de aerosol se requieren dos precursores gaseosos, cada uno con presiones de vapor subsaturadas, aunque la mezcla de ambos deber estar sobresaturada. Primero se forma un clúster con las especies involucradas, posteriormente el clúster crece en tamaño. Una vez que el clúster excede un tamaño crítico se produce la nucleación y se genera una partícula de aerosol estable. El tamaño crítico del clúster es el tamaño por encima del cual es más probable que crezca a que se evapore (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Lohmann et al., 2016; Tomasi et al., 2017). Otra forma de generar aerosol secundario es la condensación de una fase gaseosa sobresaturada sobre una partícula primaria. Por ejemplo, un recubrimiento de ácido sulfúrico condensado en una partícula de polvo mineral (Lohmann et al., 2016).

Las partículas producidas por procesos de combustión son partículas de aerosol mayoritariamente primarias e involucra una combinación de los mecanismos de conversión bulk-to-particle y gas-to-particle, pero se considera que se generan por un mecanismo distinto. La principal diferencia entre los dos mecanismos mencionados anteriormente y los procesos de combustión es la temperatura en la que toma lugar la combustión. Las altas temperaturas facilitan la formación de partículas con formas y características particulares (Tomasi et al., 2017).

El aerosol atmosférico primario emitido por la conversión bulk-to-particle suele ser de gran tamaño, con diámetros por encima de los 0.1 μm , es decir, en los modos de acumulación, grueso y partículas gigantes. Mientras que las partículas secundarias resultantes de la conversión gas-to-particle y las primarias emitidas por procesos de combustión poseen diámetros típicamente menores a 0.1 μm (Tomasi et al., 2017).

1.1.3. Fuentes del aerosol atmosférico

Las partículas de aerosol pueden provenir de diferentes fuentes, las cuales se pueden dividir en naturales y antropogénicas. Tanto partículas primarias como secundarias pueden provenir de ambas fuentes (Lohmann et al., 2016; Tomasi et al., 2017). A continuación, se mencionarán algunos ejemplos de partículas de aerosol formadas por mecanismos primarios y secundarios de fuentes naturales y antropogénicas.

Dentro de las fuentes naturales de aerosol primarias se encuentran: partículas de origen mineral, marino, volcánico, biológico y cósmico, e incendios forestales (p.ej., Levin & Cotton, 2009; Tomasi et al., 2017). Como se mencionó anteriormente, la emisión de partículas primarias depende de factores climáticos, donde las fuentes naturales como el polvo mineral y el aerosol marino son las más dependientes de estos factores (Tegen & Schepanski, 2018). Por otra parte, el aerosol secundario natural se genera por medio de la conversión de gas-to-particle. Dentro de ellos destacan los aerosoles de sulfatos formados a partir de precursores gaseosos como el dióxido de azufre emitido por volcanes y el sulfuro de dimetilo (DMS) proveniente de fuentes biogénicas, especialmente del plancton marino (Tomasi et al., 2017). De manera similar se producen nitratos en la atmósfera a partir de óxidos de nitrógeno (NO_x) producidos por la quema de biomasa, y la oxidación de NH₃ y emisiones de suelos y rayos (Lohmann et al., 2016; Tomasi et al., 2017). Finalmente, el aerosol orgánico secundario natural (SOA, por sus siglas en inglés) se genera principalmente a partir de isoprenos y terpenos emitidos por plantas (Tomasi et al., 2017; Tegen & Schepanski, 2018).

Las partículas de aerosol de fuentes antropogénicas son aquellas producidas por actividades humanas como procesos industriales, transporte, incendios, combustión de gasolina, quema de biomasa, y polvos debido a erosión en construcciones y suelos agrícolas (p.ej., Levin & Cotton, 2009; Tomasi et al., 2017). Dado que las partículas primarias antropogénicas provienen principalmente de procesos de combustión se puede encontrar mayoritariamente carbono negro en su composición. Este es un material carbonoso formado por la combustión incompleta

de combustibles fósiles y basados en biomasa, en determinadas condiciones (Smichowski & Gómez, 2015). De manera semejante a las partículas de aerosol secundarias naturales, el aerosol secundario antropogénico se produce por la condensación de vapores. En este proceso se involucran tres grupos de especies químicas: aquellas que contienen azufre (SO_x), nitrógeno (NO_x) y sustancias carbonosas (Tomasi et al., 2017).

A nivel global las fuentes naturales de partículas de aerosol se emiten en mayor concentración que las antropogénicas, sobre todo las generadas por mecanismos primarios como el polvo mineral proveniente de desiertos y aerosol marino. Las partículas de aerosol antropogénicas contribuyen con aproximadamente un 10% de la masa total del aerosol atmosférico (Lohmann et al., 2016; Tomasi et al., 2017). En el **panel a** de la **Figura 2** se muestra la profundidad óptica del aerosol total emitido alrededor del mundo (Aerosol Optical Depth, AOD), y en el **panel b** la distribución de las diferentes fuentes de aerosol. El AOD es una medida de la dispersión o absorción de radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre, producida por las partículas de aerosol presentes en una columna vertical. Es un número adimensional que nos permite estimar cuantitativamente la cantidad de aerosol sobre un lugar de observación, donde valores bajos corresponden a una atmósfera limpia (Chung et al., 2012). En la **Figura 2** se observa que el aerosol antropogénico se localiza principalmente sobre los continentes, especialmente en regiones con gran crecimiento industrial y poblacional como Asia. Además, se puede notar que la mayor concentración de polvo mineral proviene del norte de África, del Sahara.

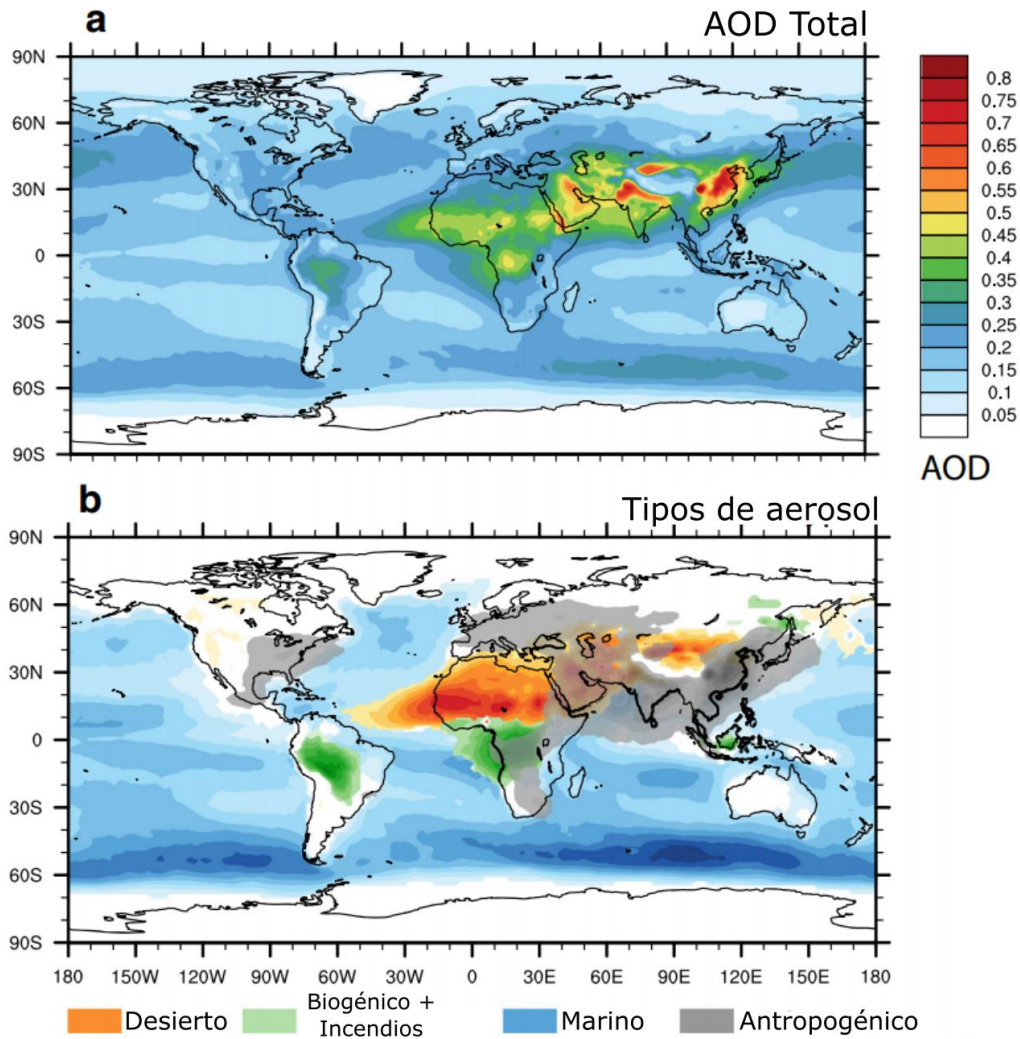


Figura 2. a) Profundidad Óptica del Aerosol (AOD) obtenida del reanálisis del Monitoring Atmospheric Composition and Climate (MACC) para el 2010. b) Distribución del aerosol proveniente de diferentes fuentes. La fracción del total del AOD para cada fuente se obtuvo del modelo ECHAM-HAM aplicado a la distribución de MACC. (Adaptada de Tegen & Schepanski, 2018).

1.1.4. Composición química

Determinar la composición química de las partículas de aerosol es importante dado que influye en sus propiedades ópticas, reactividad, capacidad para formar gotas de nube o cristales de hielo, entre otras. Esto en consecuencia dicta sus efectos sobre el ambiente, la biosfera, la salud humana, el deterioro de la visibilidad e inclusive, el deterioro de algunos materiales (Buseck & Schwartz, 2013; Tomasi et al., 2017). La composición química elemental del aerosol atmosférico es variable ya que, principalmente, depende de la fuente de emisión, de su localización, y del

mecanismo de formación (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Buseck & Schwartz, 2013). De manera general las partículas de aerosol están constituidas por carbono elemental (EC), compuestos inorgánicos y orgánicos (Smichowski & Gómez, 2015; Tomasi et al., 2017). La **Figura 3** muestra un ejemplo de la distribución porcentual de los tres constituyentes antes señalados, en diferentes tipos de partículas con un tamaño menor a $1.0 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{1.0}$) procedentes de distintos entornos, desde un área marina remota hasta una fuertemente influenciada por incendios forestales.

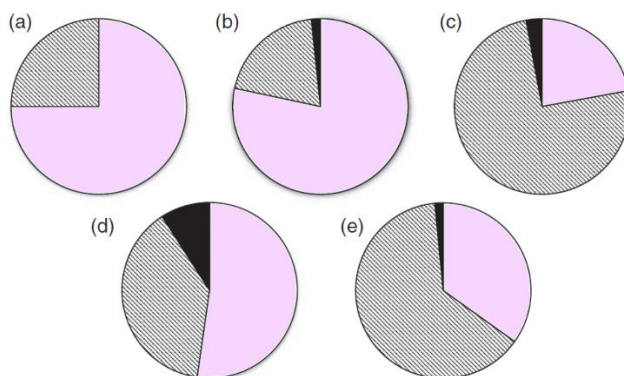


Figura 3. Distribución porcentual de compuestos inorgánicos (sección rosa), compuestos orgánicos (sección punteada) y carbono elemental (sección negra) en ejemplos de partículas provenientes de distintos entornos: a) marino prístino, b) marino contaminado, c) quema de biomasa, d) continental con alta contaminación y e) área boscosa (Adaptado de Tomasi et al., 2017).

Las especies químicas no se distribuyen por igual entre todos los tamaños de partículas, más bien tienden a distribuirse en intervalos de tamaños específicos característicos de la fuente (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Buseck & Schwartz, 2013; Colbeck, 2008). Las partículas ultrafinas tienden a contener especies secundarias como sulfatos y compuestos orgánicos. Las partículas del modo Aitken se producen por procesos de combustión y de la conversión gas-to-particle. Por lo tanto, estas partículas y las del modo de acumulación tienden a contener elementos como carbono, algunos metales traza, sulfatos, nitratos y compuestos orgánicos. Finalmente, las partículas gruesas producidas mecánicamente de fuentes naturales generalmente contienen polvo mineral y sal marina (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999).

Se suele clasificar también a los compuestos como mayores y menores, dependiendo de la proporción en la que se encuentren dentro de la composición total de la partícula de aerosol. Dentro de los compuestos mayoritarios típicamente se encuentran los sulfatos, nitratos, amonio, sodio, cloro, carbono elemental, aluminio, silicio, hierro, calcio, agua y compuestos orgánicos. Por otra parte, los principales compuestos minoritarios encontrados en concentraciones traza suelen ser principalmente metales como plomo, cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y magnesio, pero también algunos compuestos orgánicos, derivados de ácidos carboxílicos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y alifáticos, entre otros (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999; Buseck & Schwartz, 2013; Hyder & Jönsson, 2015).

Para estudiar la composición química del aerosol atmosférico se utilizan técnicas *on-line* y *off-line* (Buseck & Schwartz, 2013). En las primeras se obtiene la composición de las partículas en tiempo real, proporcionando así una serie de tiempo de la concentración promedio. Las mediciones *on-line* están principalmente basadas en el Aerosol Mass Spectrometer (AMS), un equipo de muestreo capaz de separar las partículas de aerosol por tamaño, acoplado a un espectrómetro de masas como, por ejemplo, el Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) (Ng et al., 2011; Bloss, 2019). Las mediciones *off-line* por otro lado, consisten en coleccionar el aerosol en filtros para posteriormente analizar su composición a través de diferentes técnicas analíticas en un laboratorio. Pueden tener una resolución temporal de horas hasta días, dependiendo del objetivo y la concentración de partículas en el lugar de interés. Se suelen usar con mayor frecuencia las técnicas *off-line* que las *on-line* debido a que son más accesibles, fáciles de usar y permiten un mayor número de análisis (Buseck & Schwartz, 2013; Hyder & Jönsson, 2015; Smichowski & Gómez, 2015). En el presente trabajo se utilizó un impactador de alto volumen como método de colección *off-line* y, para los análisis químicos y mineralógicos, se aplicaron técnicas de espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), fluorescencia de rayos X (XRF), cromatografía de intercambio iónico (IEC) y difracción de rayos X (XRD).

1.1.5. Efectos en el sistema climático

El aerosol atmosférico puede influir en el sistema climático por medio de dos efectos: el efecto directo y el indirecto. El efecto directo se refiere a la interacción de las partículas de aerosol con la radiación y el indirecto a la interacción aerosol-nubes. En esta sección se definirán más a detalle ambos efectos y se hablará de la importancia de cada uno.

1.1.5.1. Efecto directo

El aerosol tiene la capacidad de alterar la cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre ya que posee la capacidad de absorber, emitir o dispersar la radiación solar o terrestre (Finlayson-Pitts & Pitts, 1999). Una manera de cuantificar el impacto de diferentes factores en el sistema climático es el forzamiento radiativo (RF, por sus siglas en inglés). El RF representa el cambio neto en el balance de energía del sistema terrestre debido a una perturbación impuesta (Myhre et al., 2013). Generalmente el RF se define en términos del desequilibrio energético en la parte superior de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés). De esta manera el forzamiento radiativo que es una medida de la influencia que tiene un factor para modificar el equilibrio de la energía entrante y saliente en el sistema atmosférico de la Tierra, indica la respuesta de la temperatura media global de la superficie respecto al factor o perturbación impuesta, siendo positivo para un calentamiento y negativo para un enfriamiento (Buseck & Schwartz, 2013; Myhre et al., 2013).

Dependiendo de su tamaño, propiedades fisicoquímicas y ópticas, las partículas de aerosol pueden afectar el balance radiativo (Buseck & Schwartz, 2013; Tomasi et al., 2017). Por ejemplo, partículas como los sulfatos y nitratos poseen un RF negativo dado que reducen la radiación solar entrante dispersándola de vuelta al espacio (**Figura 4a**). Otras partículas como el carbono negro absorben la radiación y calientan la superficie terrestre, efecto que se refleja en un RF positivo (**Figura 4b**) (Myhre et al., 2013). Además, las partículas pequeñas de tamaños submicrométricos tienden a dispersar una mayor cantidad de luz por unidad de masa y tienen un tiempo de residencia mayor en la atmósfera comparado con las

partículas más grandes (Buseck & Schwartz, 2013). Si se toman en cuenta todas las contribuciones, el efecto neto debido al aerosol atmosférico es negativo, es decir, tienden a disminuir la temperatura media global (Myhre et al., 2013).

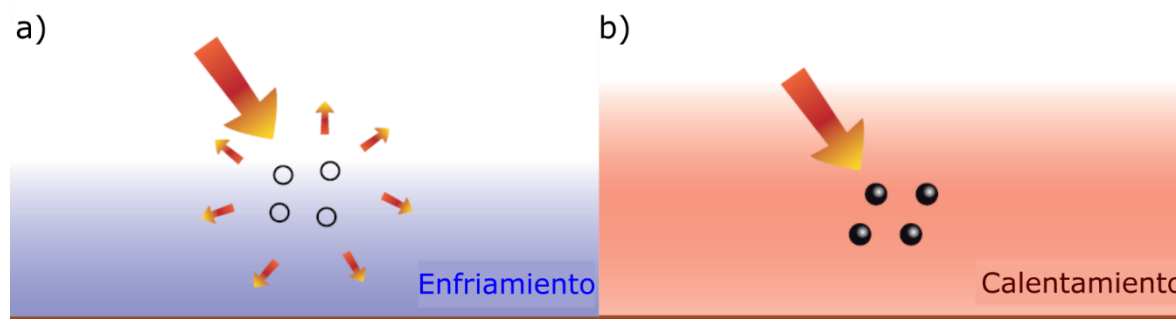


Figura 4. Efecto directo de las partículas de aerosol: a) dispersión de radiación y el consecuente enfriamiento de la superficie y b) absorción de radiación y el consecuente calentamiento de la superficie (Modificado de Boucher et al., 2013).

1.1.5.2. Efecto indirecto

Algunas partículas pueden actuar como núcleos de condensación de nube (CCN, por sus siglas en inglés) o núcleo de glaciación (INP, por sus siglas en inglés) esenciales para la formación de gotas líquidas y cristales de hielo en la atmósfera, respectivamente (Lohmann et al., 2016). Sin la presencia de CCNs en la atmósfera no sería posible la formación de gotas líquidas ya que se requieren valores de humedad relativa respecto al agua que naturalmente no ocurren ($RH_a > 200\%$) (Rogers & Yau, 1989). Por otro lado, para generar cristales de hielo espontáneamente a partir de una gota líquida se requiere que la humedad relativa respecto al hielo (RH_i) sea mayor a 140% y temperaturas menores a -38°C , condiciones que sólo se alcanzan a grandes alturas en la atmósfera (Pruppacher & Klett, 1997; Lohmann et al., 2016; Kanji et al., 2017). Los INPs facilitan la formación de cristales de hielo a temperaturas mayores a los -38°C y RH_i menores de 140% (Kanji et al., 2017). De esta manera el aerosol atmosférico también regula el ciclo hidrológico, modificando las propiedades microfísicas de las nubes y los patrones de precipitación (Gunn & Phillips, 1957; Boucher et al., 2013).

Entre los CCNs más importantes se encuentran el aerosol marino y los sulfatos provenientes de fuentes antropogénicas o naturales (Lohmann et al., 2016; Sun &

Ariya, 2006). Existen diferentes tipos de aerosol que pueden actuar como un INP, entre ellos el polvo mineral, el aerosol marino, los compuestos orgánicos, las partículas de origen biológico y, las partículas provenientes de la quema de biomasa y combustibles fósiles (Kanji et al., 2017). La formación de cristales de hielo tiene especial relevancia, dado que la mayor parte de la precipitación observada sobre los continentes proviene de nubes que contienen cristales de hielo (Mülmenstädt et al., 2015). También, las partículas de aerosol pueden alterar las propiedades radiativas de las nubes (Twomey, 1977). A estos efectos en conjunto se les conocen como efecto indirecto o interacción aerosol-nube.

1.1.6. Mecanismos de eliminación

Una vez que las partículas de aerosol son emitidas a la atmósfera pueden permanecer en la troposfera horas, días y hasta semanas, dependiendo de su tamaño y composición (Buseck & Schwartz, 2013). El aerosol disminuye su concentración o se elimina de la atmósfera a través de dos mecanismos que están regidos por el tamaño de las partículas. El primero es el depósito seco que ocurre, principalmente, debido a la gravedad y a modificaciones en las líneas de flujo que siguen las partículas en la atmósfera. Las partículas del modo grueso se sedimentan en la superficie terrestre o vegetación por acción de la gravedad (Buseck & Schwartz, 2013; Tomasi et al., 2017). Mientras que las partículas en modo de nucleación o Aitken pueden ser interceptadas por algún obstáculo o chocar con otras partículas de aerosol, aumentando su tamaño, por lo que pueden depositarse por la acción de la gravedad o impactar en alguna superficie. La tasa de remoción por depósito seco es baja para las partículas en modo de acumulación (Tomasi et al., 2017).

El segundo mecanismo sucede por la colisión/coalescencia de partículas de aerosol con hidrometeoros (p.ej., gotas de lluvia, nieve, granizo), por lo que es llamado depósito húmedo. El depósito húmedo incluye la recolección de partículas dentro de la nube y debajo de ella. El depósito húmedo dentro de la nube tiene lugar cuando las partículas de aerosol quedan suspendidas o disueltas en gotas de nubes y/o cristales de hielo al actuar como CCNs o INPs, o cuando son capturados por una

colisión. La remoción de aerosol por su activación como CCNs o INPs es llamada también barrido por nucleación. El barrido por nucleación es bastante eficiente, sobre todo en partículas en modo de acumulación (Buseck & Schwartz, 2013; Lohmann et al., 2016; Tomasi et al., 2017). Por último, el depósito húmedo debajo de la nube, también conocido como barrido por precipitación, hace referencia a la captura de partículas y algunos gases por hidrometeoros que precipitan. Este proceso es crucial para limpiar la atmósfera de contaminantes (Tomasi et al., 2017). El que este proceso ocurra depende del tamaño del hidrometeoro y el de las partículas de aerosol. El más eficiente es el que ocurre con partículas de modos Aitken y grueso (Buseck & Schwartz, 2013; Lohmann et al., 2016). La **Figura 5** esquematiza de manera general los mecanismos de remoción de las partículas de aerosol.

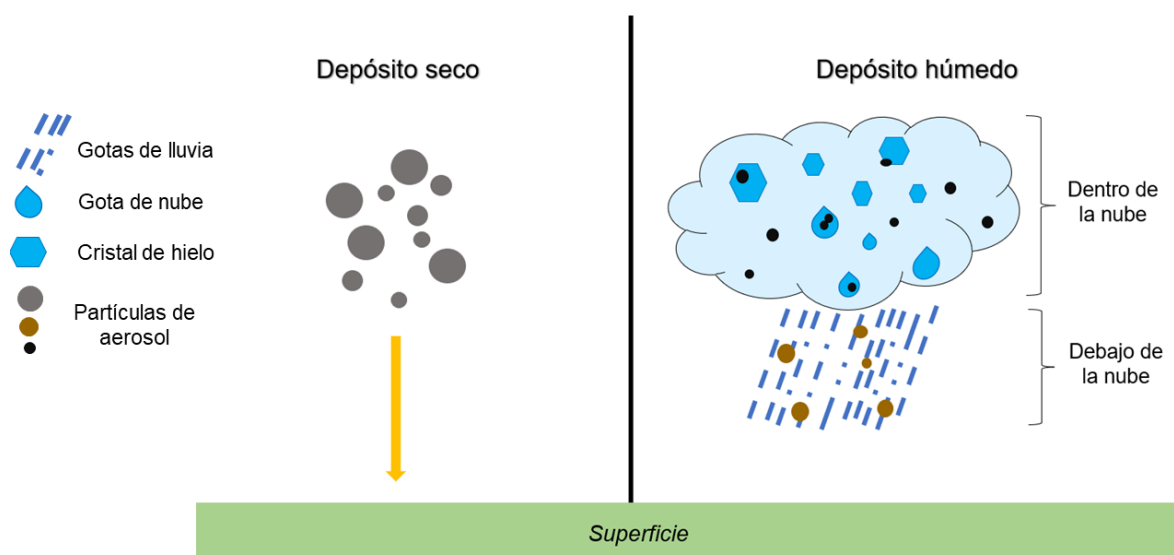


Figura 5. Mecanismos de eliminación de partículas de aerosol atmosférico: depósito seco (izquierda) y depósito húmedo (derecha).

1.2. Polvo mineral del desierto del Sahara

El polvo mineral es el segundo tipo de aerosol atmosférico más abundante en la atmósfera, sólo después de la sal marina (Lohmann et al., 2016). Por lo tanto, las partículas de polvo mineral tienen una gran influencia en el sistema climático tanto en el balance radiativo como en el ciclo hidrológico al ser capaces de actuar como CCNs y/o INPs (Lohmann et al., 2016; Tomasi et al., 2017). Aproximadamente el

50-70% de las emisiones globales de polvo mineral provienen del norte de África, concretamente del Sahara (Ginoux et al., 2004). Adicional a los efectos directos e indirectos del polvo mineral, el polvo africano puede influir en la formación de ciclones tropicales (Dunion & Velden, 2004) y ocasionar efectos adversos en la salud humana al degradar la calidad del aire (Buseck & Schwartz, 2013; Ramírez-Romero et al., 2021). Así como también puede ser un medio acarreador de partículas biológicas y nutrientes (Hara & Zhang, 2012; Yu et al., 2015)

1.2.1. Propiedades químicas y mineralógicas

El polvo mineral es una mezcla compleja de partículas y agregados con una composición química altamente variable y diversa mineralogía. Entre sus componentes típicos se encuentran los feldespatos, el cuarzo, diversos minerales arcillosos, carbonatos, sulfatos, fosfatos, óxidos (p.ej., de hierro y titanio) y sales marinas (Claquin et al., 1999; Kandler et al., 2009). El polvo del Sahara contiene en su mayoría minerales arcillosos, con tamaños menores a 2 μm , como illita, caolinita, esmectita y cuarzo (Formenti et al., 2003); además de feldespato, hematita, calcita y yeso con tamaños que forman parte de la fracción limosa (de 2 a 50 μm). La illita y el cuarzo se encuentran dentro de los minerales mayoritarios (Claquin et al., 1999; Engelbrecht et al., 2016). Los minerales arcillosos del polvo mineral son utilizados como una huella digital para identificar las fuentes de las que provienen las partículas de aerosol (p.ej., Caquineau et al., 1998).

1.2.2. Transporte

Las partículas de aerosol pueden ser transportadas desde su lugar de origen a otras regiones ubicadas en la dirección del viento (Levin & Cotton, 2009). El polvo del Sahara específicamente puede ser arrastrado por el viento grandes distancias llegando incluso a otros continentes (Lohmann et al., 2016). Modelos climáticos estiman que se transportan entre 200 y 260 millones de toneladas del polvo del Sahara por año. Cerca del 60% de este polvo se desplaza hacia el sur hasta el golfo de Guinea, el 28% se desplaza al oeste hasta el Océano Atlántico Norte y el 12% hacia Europa (p.ej., D'Almeida, 1986). Durante todo el año se originan plumas de

polvo en el Sahara donde su movimiento está regulado por los patrones de circulación global. De tal manera que este tipo de partículas son llevadas hacia el sur con mayor frecuencia durante el invierno, y al norte y oeste durante el verano. Ocasionalmente, el polvo africano es transportado hacia el este cuando ocurre algún cambio que permita moverse en dirección opuesta al patrón de circulación general (D'Almeida, 1986; Prospero, 1999; Shao et al., 2011). A finales de la primavera, durante el verano y a principios de otoño, se forma una capa de aire extremadamente caliente sobre el Sahara, muy seca y cargada de polvo, llamada Capa de Aire Sahariana (SAL, por sus siglas en inglés). Esta capa tiene un espesor de aproximadamente 3 a 4 km, con una base que comienza aproximadamente a 1.6 km sobre la superficie terrestre. La SAL se superpone al aire más frío y húmedo del océano Atlántico, y se mueve a través de él, alcanzando su máxima intensidad durante el verano (Carlson & Prospero, 1972; Prospero & Carlson, 1972; Liu et al., 2008). Múltiples estudios se han realizado acerca de la llegada del polvo del Sahara al océano Atlántico norte utilizando datos satelitales (p.ej., Adams et al., 2012; Liu et al., 2008). En estos estudios se confirma que el polvo mineral cruza el caribe y es capaz de llegar al golfo de México, arribando primero a la península de Yucatán. Actualmente existen servicios de monitoreo global al alcance del público general, donde se puede obtener un pronóstico de cinco días de las partículas de aerosol, de los contaminantes, de los gases de efecto invernadero, del ozono estratosférico y del índice UV. Por ejemplo, el Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) donde se puede obtener el pronóstico de diferentes tipos de aerosol, entre ellos el polvo mineral (Copernicus Programme, 2021). También se pueden obtener imágenes satelitales donde se observa el movimiento del polvo africano y su llegada a México, como en la **Figura 6**.

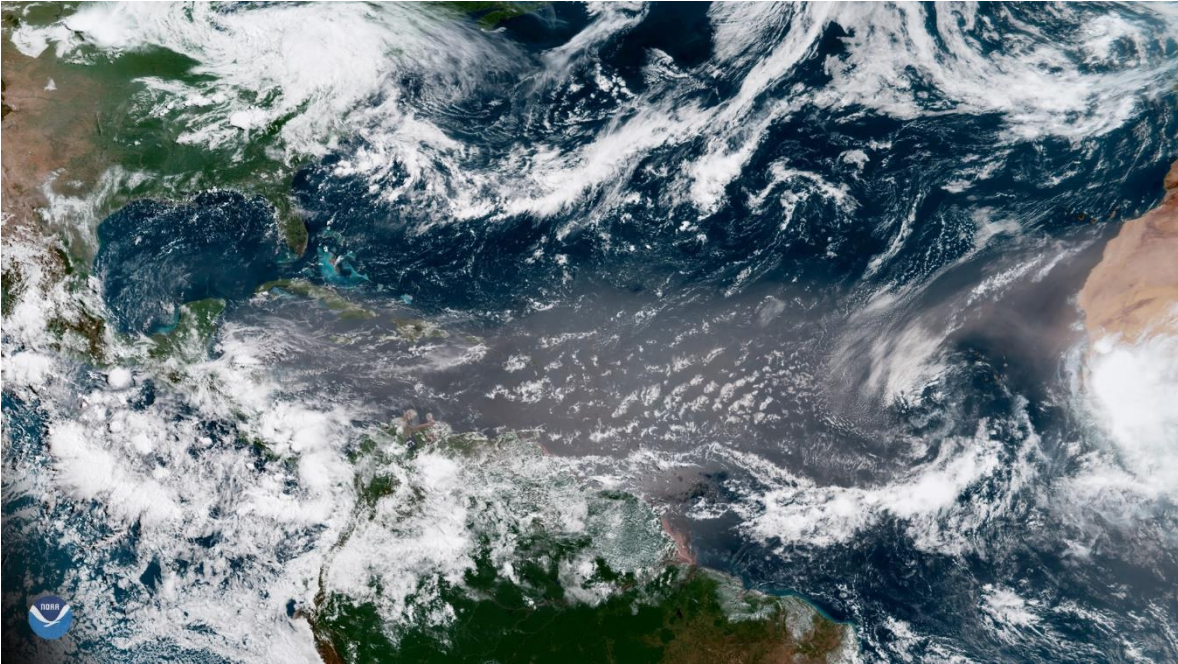


Figura 6. Imagen satelital de una columna de polvo del Sahara atravesando el Océano Atlántico Norte captada por el Satélite GOES East el 27 de junio de 2018 (NOAA, 2018).

1.2.3. Estudios previos en México

Como se discutió anteriormente existen varios estudios que comprueban la llegada del polvo africano hasta la península de Yucatán, mediante modelos. Existen pocos estudios experimentales realizados en el territorio mexicano que involucren mediciones *in situ* (Córdoba et al., 2021; Raga et al., 2021; Ramírez-Romero et al., 2021). A continuación, se describirá cada uno de ellos:

El primer estudio en identificar experimentalmente la llegada del polvo de Sahara a México fue el realizado por Ramírez-Romero et al. (2021). Se llevaron a cabo dos campañas de muestreo en el Observatorio Atmosférico de Mérida en julio de 2017 y julio de 2018. Durante las campañas de muestreo se monitoreo la concentración numérica y másica de partículas por medio de técnicas *on-line*. Se colectaron muestras de aerosol $PM_{2.5}$ y PM_{10} para su análisis químico usando la técnica de XRF. Se utilizaron también datos de radiosondeos atmosféricos y reanálisis para determinar la distribución regional y vertical de las condiciones meteorológicas, junto con su monitoreo directo en el sitio de muestreo. Los autores encontraron picos de concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , que se muestran en la **Figura 7**, con un aumento

del 200% y 500% respecto a los niveles base para Mérida (Yucatán). Tales picos corresponden a las intrusiones del polvo mineral desde África, que se observaron en imágenes satelitales, radiosondeos atmosféricos, reanálisis y retrotrayectorias de las masas de aire. Además, se encontró que predominan especies como Si, Fe y Al en la composición química elemental de las muestras cuando ingresa el polvo del Sahara a la península de Yucatán (**Figura 7**), lo cual conforma una evidencia de que el origen de las partículas de aerosol muestreadas es predominantemente el polvo mineral.

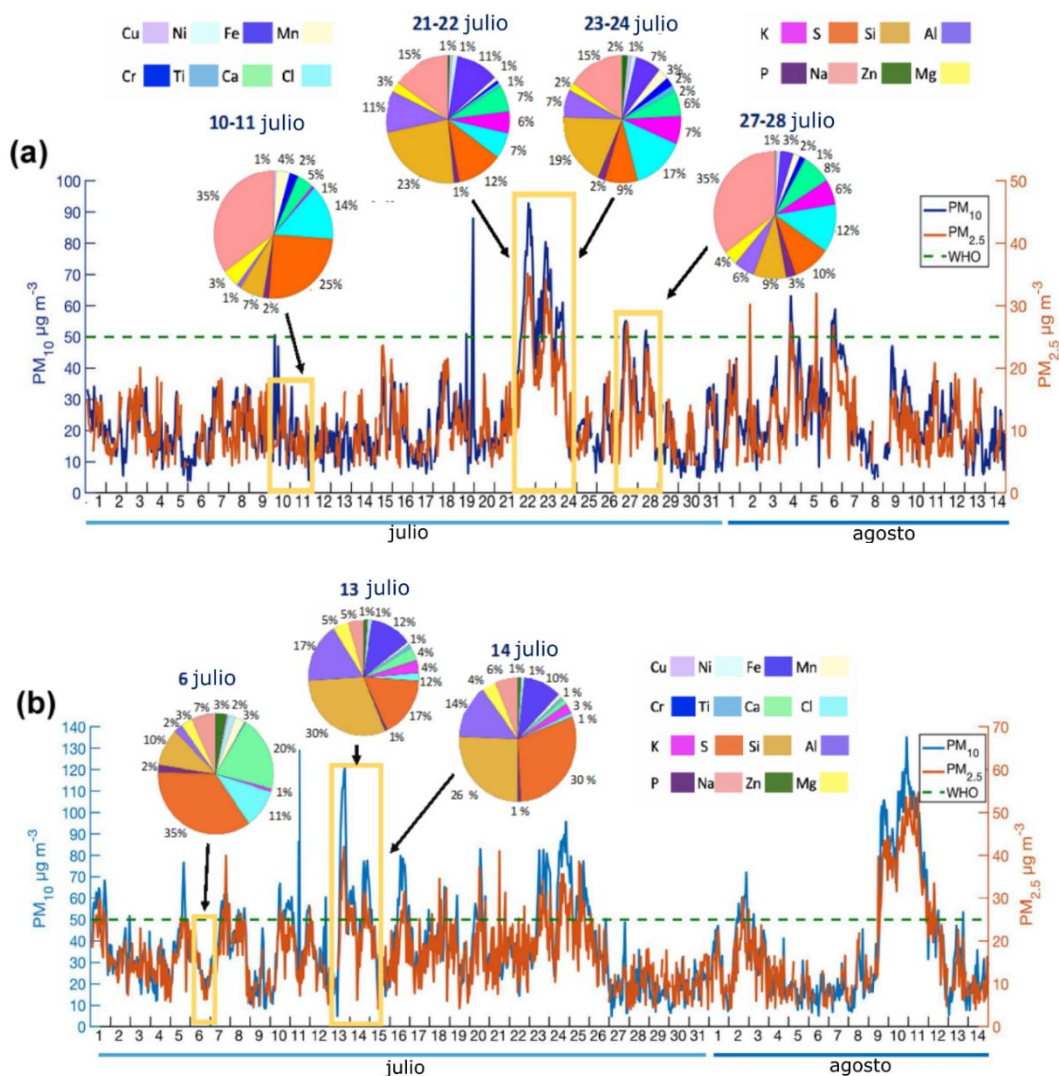


Figura 7. Concentración másica de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en a) 2017 y b) 2018, así como composición química elemental porcentual obtenida por XRF (Adaptado de Ramírez-Romero et al., 2021).

Córdoba et al. (2021) realizó un muestreo de partículas entre enero de 2017 y julio de 2018 en Sisal y Mérida, Yucatán. Los autores encontraron que las partículas de polvo africano que arriban a territorio mexicano se encuentran en mayor concentración en tamaños de partícula pequeños (entre 0.3 – 5 μm) y que son capaces de actuar como INPs en un rango de temperaturas de -15°C a -30°C . Además, encontraron que durante las intrusiones de AD se observa la concentración más alta de INPs, es decir, que un mayor número de partículas fue capaz de formar cristales de hielo comparado con lo observado en las muestras de BB y MA. De esta manera los autores sugieren que el polvo mineral del Sahara puede influir en la formación de cristales de hielo en la península de Yucatán y regular los patrones de precipitación regionales.

Raga et al. (2021) muestra una compilación del trabajo realizado durante el proyecto ADABBOY (African Dust And Biomass Burning Over Yucatan) llevado a cabo entre enero de 2017 y agosto de 2018 en la península de Yucatán. Durante ese periodo se monitoreó la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , se identificaron las fuentes de las partículas de aerosol, tanto de la línea base como durante episodios con altas concentraciones de partículas. Tales episodios con concentraciones máxicas de PM_{10} están relacionados con emisiones regionales de BB y el transporte a larga distancia de plumas de AD. La composición elemental de la línea base de partículas de aerosol está dominada por Cl, Na y S. Las partículas de BB están enriquecidas en K y S, y las provenientes del AD están enriquecidas en Al, Fe y Si. La composición química elemental fue obtenida por XRF. Además, se analizaron las condiciones meteorológicas involucradas en el transporte del polvo del Sahara. La **Figura 8** muestra la llegada de masas de aire provenientes de África donde se puede observar que en julio ocurre el pico máximo de concentración de polvo.

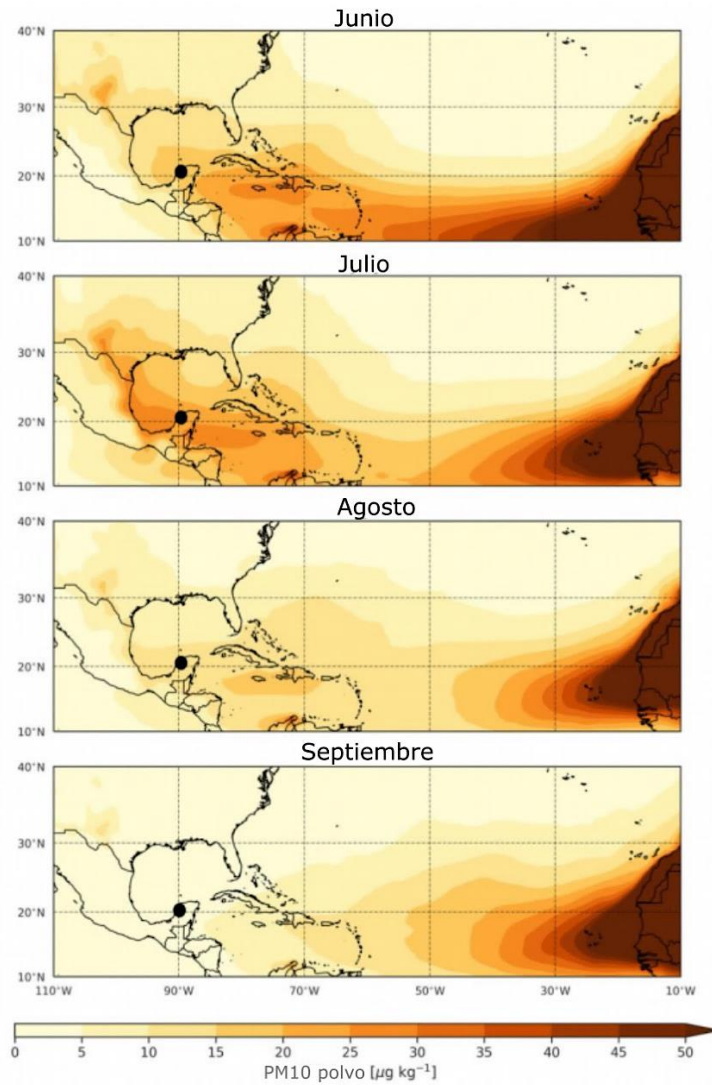


Figura 8. Promedio mensual de junio a septiembre de la concentración de PM_{10} asociada con el polvo mineral, obtenida con datos del 2003 al 20019 de MERRA-2 (Adaptado de Raga et al., 2021).

1.3. Polvo mineral proveniente de suelos

Las partículas de polvo mineral no sólo pueden provenir de los desiertos alrededor del mundo, también pueden originarse de la suspensión de partículas minerales que constituyen la fracción inorgánica el suelo (Lohmann et al., 2016). Como se vio en el punto anterior, el polvo del Sahara puede atravesar la península de Yucatán, y a su paso, no solo influye en aspectos relacionados con la atmósfera, también puede llegar a depositarse en la superficie y por lo tanto influir en las propiedades de los suelos. De tal manera que existe una interacción entre el polvo mineral de la

península arrastrado por el viento y el polvo africano. En esta sección se darán algunos detalles generales de la formación de suelo, así como de la composición del suelo en la península de Yucatán.

1.3.1. Formación del suelo

El suelo es un sistema biogeoquímico complejo que forma la capa más superficial de la Tierra, con excepción de los océanos y otros cuerpos de agua, cuyo espesor varía de algunos centímetros a pocos metros. Se compone de partículas minerales, material orgánico, aire, agua y organismos vivos (Doula & Sarris, 2016). El suelo se forma de manera continua pero lenta, a partir del intemperismo gradual de las rocas, mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Su composición mineral depende de la composición del material parental (rocas), y su formación del relieve, el clima, el tiempo, la acción de microorganismos vivos y la acción catalítica de minerales, principalmente amorfos (Hillel, 2008; Kalev & Toor, 2018).

El primer paso para la formación del suelo es el intemperismo físico de la roca madre, que reduce su tamaño, seguido por el intemperismo químico, este material se acumula y forma un substrato donde continúa el proceso. Sobre este substrato alterado se asientan microorganismos y materia orgánica que contribuyen a aumentar la reactividad y formar el humus (material orgánico proveniente de la descomposición de los restos de seres vivos en mayor o menor grado). Posteriormente cuando existe una capa de algunos milímetros puede aparecer la primera vegetación, que con sus raíces aceleran la degradación de rocas más profundas. Con el paso del tiempo, se desarrollan más horizontes que se pueden diferenciar, formando un suelo más profundo (Amundson, 2003; Hillel, 2008).

El perfil del suelo es un corte vertical donde se pueden observar los horizontes del suelo, cada uno con diferente estructura y composición. La **Figura 9** es un esquema de las tres capas principales del suelo. La capa más profunda u horizonte C está formado principalmente por la roca original y pizarras, es el que confiere las características minerales al suelo. El horizonte A, es el más superficial, rico en arcillas, materia orgánica humedificada y alta capacidad de retención de nutrientes,

por lo que es donde se enraíza la vegetación. Entre ambos se encuentra el horizonte B, con menor actividad biológica, pobre en materia orgánica y rico en óxidos de hierro y aluminio lixiviados del horizonte A, formado por una mezcla de rocas y partículas de tamaño medio (Doula & Sarris, 2016; Hillel, 2008; Kalev & Toor, 2018).

La composición del suelo se puede dividir en diferentes fases: la fase sólida, la líquida y la gaseosa. Entre la mitad y dos tercios del volumen de un suelo corresponde a materiales sólidos. Más del 90% del mismo son compuestos inorgánicos y el resto materiales orgánicos. La parte inorgánica está principalmente constituida de arcillas (fragmentos de rocas y minerales con un tamaño menor a 2 μm). La parte orgánica representa menos del 10% del suelo, contiene microorganismos y humus, por lo tanto, es muy rica en macro y micronutrientes, con alta capacidad de intercambio (retención y liberación de elementos de la superficie de las partículas sólidas con actividad química). La fase líquida está formada por agua contenida en los poros del suelo, donde esta agua lleva en disolución sales minerales, coloides de arcillas y humus. Por último, la fase gaseosa está formado por aire similar al atmosférico, pero con mayor concentración de CO_2 , que ocupa los poros de tamaño grande o aquellos en los que el agua se ha consumido (Kalev & Toor, 2018).

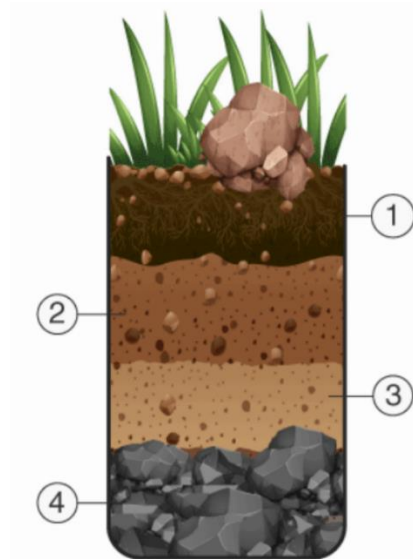


Figura 9. Perfil horizontal del suelo: (1) Horizonte A, (2) Horizonte B, (3) Horizonte C, (4) Roca madre (Byju's Learning, 2021)

1.3.2. Los suelos de la península de Yucatán

En la península de Yucatán se distinguen 5 ambientes geomorfológicos (paisajes terrestres agrupados por las condiciones bajo las cuales se formaron): marino litoral, palustre, pseudopalustre, kárstico y tecto-kárstico (Bautista et al., 2015). Ya que la mayor parte del paisaje de esta península es kárstico (**Figura 10**) (Williams & Fong, 2016). A continuación, se presenta información sobre las principales características de este ambiente.

Karst o carst se refiere a un tipo especial de paisaje desarrollado en áreas dominadas por rocas relativamente solubles como la halita (NaCl), anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y, principalmente, las calizas (CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Se forma a través de la disolución de las rocas por el agua superficial o subterránea (Jennings, 1971) y la precipitación de los iones que contiene. El ambiente kárstico es bastante peculiar, está caracterizado por sistemas de drenaje subterráneo con sumideros y cuevas (Stevanović, 2015), formados por las transformaciones de los carbonatos insolubles en bicarbonatos solubles y viceversa. La península de Yucatán es una plataforma calcárea compuesta primordialmente de roca caliza con un alto contenido de CaCO_3 , entre el 89% y 99% (Bautista et al., 2015). El karst del estado de Yucatán, por ejemplo, tiene su origen en los arrecifes coralinos y sedimentos marinos que, al exponerse a la superficie, formaron la roca caliza (Estrada et al., 2019).

Los suelos dominantes en la península de Yucatán son los Leptosoles, suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados (Bautista et al., 2015). Entre los principales materiales parentales del suelo de esta península se encuentran sedimentos marinos, residuos volcánicos ricos en illita, caolinita, esmectita, montmorillonita, clorita y polvo mineral proveniente del Sahara depositado cada año. Debajo de todos estos materiales subyace la roca caliza (Cabadas et al., 2010).

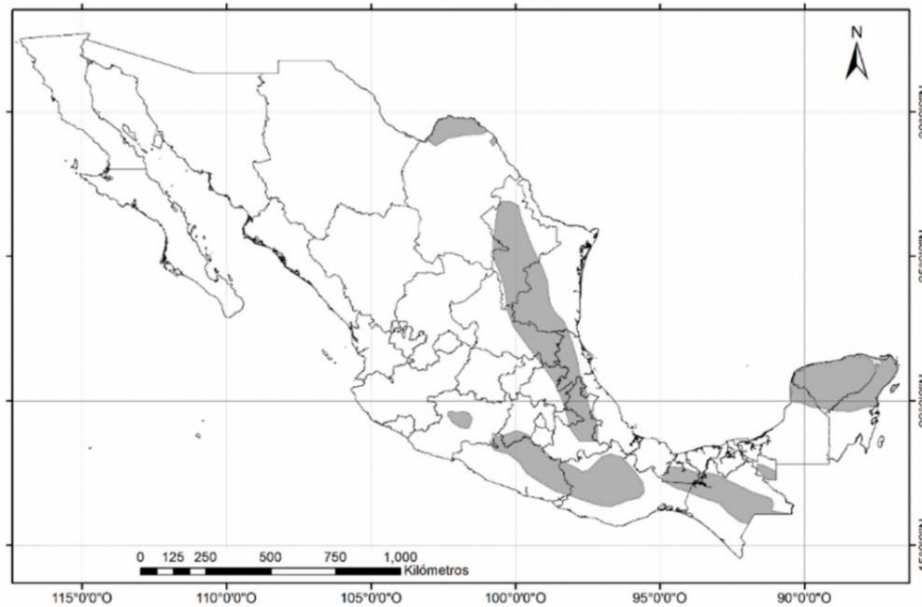


Figura 10. Zonas kársticas en México (Williams & Fong, 2016).

1.4. Motivación

Si bien los estudios desarrollados por Ramírez-Romero et al. (2021), Córdoba et al. (2021) y Raga et al. (2021) ofrecen información novedosa sobre las intrusiones de polvo africano en México, es necesario considerar que los estudios fueron realizados en Mérida, ciudad que se encuentra a aproximadamente 300 km de la costa este de la península de Yucatán (el punto de entrada del polvo del Sahara a México). Por lo que la composición química reportada del polvo africano podría tener una fuerte influencia de las emisiones locales dentro de la península, y/o que el polvo mineral caracterizado pueda provenir de la re-suspensión del suelo. Para abordar estas posibles fuentes de incertidumbre nace el presente trabajo, donde se evalúa la composición química y mineralógica de partículas de aerosol y muestras de suelo recolectadas en diferentes puntos al este y oeste de la península de Yucatán.

Como se mencionó anteriormente el polvo africano puede afectar la calidad del aire, la formación de nubes, el desarrollo de precipitaciones y puede ser portador de partículas biológicas y nutrientes. Por lo que realizar estudios de campo es de vital

importancia para comprender su impacto en la formación del suelo, en la ecohidrología de la región y en la salud de los habitantes de Yucatán.

1.5. Hipótesis

Existe un transporte de partículas de polvo mineral desde el desierto del Sahara hasta la península de Yucatán. Además, estas partículas tendrán un cambio en su composición química y mineralógica debido a su interacción con las emisiones locales de Yucatán.

1.6. Objetivos

1.6.1. General

Identificar el transporte de polvo del Sahara hasta la península de Yucatán mediante el análisis concentración de material particulado, variables meteorológicas, datos satelitales, y composición química y mineralógica de muestras partículas de aerosol y muestras de suelo.

1.6.2. Específicos

- Confirmar las intrusiones de polvo del Sahara en la península de Yucatán por medio del monitoreo del material particulado (PM), datos satelitales, datos meteorológicos en superficie y en el perfil vertical.
- Establecer si existe algún cambio en las masas de aire cargadas de partículas de polvo del Sahara a su paso por la península de Yucatán, a través del análisis de muestras de aerosol tomadas en paralelo en la costa este y en la costa oeste.
- Diferenciar la contribución del polvo del Sahara en la concentración de fondo de la península de Yucatán mediante la variación de la concentración de especies químicas durante las intrusiones de polvo africano.
- Determinar si el polvo mineral identificado en la península de Yucatán proviene del transporte del polvo del Sahara y no de una re-suspensión del suelo, por medio de sus proporciones elementales.

- Evaluar el efecto de las intrusiones de polvo del Sahara sobre el suelo de la península de Yucatán, mediante el análisis de la composición mineralógica de muestras de suelos y muestras de partículas de aerosol durante el periodo de llegada de polvo del Sahara.

2. Metodología

2.1. Muestreo

Con el fin de aumentar la probabilidad de recolectar muestras de polvo provenientes del Sahara en la península de Yucatán se diseñó una campaña de muestreo del 3 al 24 de julio de 2021. El período fue seleccionado tomando en cuenta que las intrusiones de polvo africano suceden con mayor frecuencia e intensidad durante el verano, como se explicó previamente (Raga et al., 2021). Durante esta campaña se recolectaron partículas de aerosol en dos sitios en paralelo, en la isla de Cozumel como primer punto de contacto entre el polvo africano y la península (**Figura 11, A1**), y en el puerto de Sisal en Yucatán, como punto ubicado al oeste de la península, donde el polvo del Sahara probablemente se ha mezclado con las emisiones locales (**Figura 11, A2**). Además, durante la campaña de mediciones se registraron las condiciones meteorológicas en los sitios seleccionados para el muestreo de partículas de aerosol. Por otra parte, las muestras de suelos fueron recolectadas fuera de la campaña de muestreo en tres lugares, uno al este en la isla de Cozumel (**Figura 11, S1**) y dos al oeste en el municipio de Hunucmá, Yucatán (**Figura 11, S2 y S3**).

En las siguientes secciones se describen las características de los sitios de recolección, los equipos de muestreo, los datos meteorológicos y las técnicas de análisis químico utilizadas.



Figura 11. Sitios de muestreo en la península de Yucatán: muestreo de aerosol atmosférico (A1, A2) y muestreo de suelos (S1, S2 y S3)

2.1.1. Descripción de los sitios de muestreo

2.1.1.1. Cozumel, Quintana Roo

Cozumel es una isla ubicada en el Caribe mexicano a 19 km de la costa, colinda con el mar Caribe y el municipio de Solidaridad, Quintana Roo (INAFED, 2021; Ayuntamiento de Cozumel, 2021). La isla mide aproximadamente 48 km de norte a sur y 14.8 km de este a oeste, con una extensión total de 647.33 km². Constituye una planicie sin elevaciones importantes, con diferentes ecosistemas tropicales: selva tropical subperennifolia, selva baja, manglares, arrecifes de coral y dunas costeras, entre otros (Vázquez & May, 2016; Ayuntamiento de Cozumel, 2021). Cozumel se caracteriza por un clima húmedo, con abundantes lluvias en verano y una temperatura media anual de 25.5°C (Carrillo, 2011). Posee una población de alrededor de 88,626 de habitantes, la actividad industrial es limitada y su principal actividad económica es el turismo (INEGI, 2010; SNIM, 2021).

El muestreo y monitoreo de partículas de aerosol se realizó en el punto **A1** señalado en la **Figura 11**. El periodo de muestreo comenzó el 6 de julio de 2021 y finalizó el 23 de julio de 2021. Los equipos de medición fueron colocados y asegurados en la azotea de un edificio de un piso en San Miguel, el único poblado y capital de la isla ($20^{\circ}29'48.1''\text{N}$, $86^{\circ}56'31.6''\text{W}$). El edificio está ubicado en la parte oeste de la isla, a aproximadamente 1.7 km del puerto de Cozumel, 2 km del Aeropuerto Internacional de Cozumel y aproximadamente 14 km por carretera del extremo este. La zona inmediata al edificio se encuentra ocupada por casas (Google Maps, 2021). Por otra parte, en abril de 2022 se recolectó una muestra superficial de suelo en la carretera transversal de Cozumel, que atraviesa la isla de oriente a poniente. La muestra fue tomada en la zona selvática alrededor del km 4 de la carretera, en el punto **S1** de la **Figura 11** ($20^{\circ}27'39.6''\text{N}$, $86^{\circ}53'16.9''\text{W}$).

2.1.1.2. Sisal, Yucatán

Sisal es un puerto ubicado en el litoral norponiente del estado de Yucatán, en el municipio de Hunucmá, localizado a aproximadamente 49 km de Mérida y 98 km por carretera de puerto Progreso (Google Maps, 2022). Al norte del puerto de Sisal se encuentra el golfo de México, al sur los municipios de Samahli y Tetíz, al este Progreso y Ucú, y al oeste Celestún (INAFED, 2021). Posee un clima cálido semiseco con lluvias en verano y escasas precipitaciones el resto del año. Las temperaturas varían entre los 20°C y 34°C a lo largo del año. Los ecosistemas predominantes son manglares, dunas y ciénegas (Guadarrama et al., 2018; SEMAR-DIGAOHM, 2021). Se desarrollan actividades pesqueras sobre todo de pulpo, mero, dogfish y cangrejo rey; cultivo de maíz, algunos cítricos y plátano; y extracción de sal. No hay actividad industrial en la zona, por lo que las emisiones antropogénicas son menores (SEMAR-DIGAOHM, 2021).

Se usaron las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la Unidad Académica Sisal (UAS) de la UNAM, como punto de muestreo **A2** en la **Figura 11** ($21^{\circ}09'48.5''\text{N}$, $90^{\circ}02'53.5''\text{W}$), para realizar la campaña de mediciones de partículas de aerosol del 3 al 24 de julio de 2021. La UAS se localiza a aproximadamente 25 km del centro de Hunucmá y alrededor de 1 km de la Reserva Ecológica Estatal El Palmar. En las

inmediaciones de las instalaciones se encuentra el golfo de México y la vegetación es la propia de la costa (Google Maps, 2021). En la **Figura 12** se muestra la disposición de los equipos en la azotea del Instituto de Ingeniería.



Figura 12. Vista de la instalación de equipos en Sisal, Yucatán

2.1.1.3. Reserva Ecológica Estatal El Palmar, Yucatán

El Palmar es un área natural protegida con carácter de Reserva Estatal, declarada el 29 de enero de 1990, y también declarada Humedal de Importancia Internacional Ramsar el 27 de noviembre de 2003. El Palmar se encuentra en la costa noreste de Yucatán, cuenta con una superficie 39,950.28 ha que pertenecen a los municipios de Hunucmá y Celestún, y abarca 7,981.17 ha de superficie marina. En la reserva El Palmar existen distintos tipos de ecosistemas como manglar, duna costera, sabana, pastizal, selva baja, entre otros. (Secretaría de Desarrollo Sustentable, 2022). Se localiza a aproximadamente 18 km del centro de Hunucmá y 45 km de Mérida (Google Maps, 2022). El área costera de la reserva está prácticamente incomunicada, así que para ingresar a El Palmar se debe utilizar la vía terrestre atravesando la selva desde la carretera Hunucmá-Sisal. En este sitio se recolectó una muestra de suelo en julio de 2021, en el punto **S2** de la **Figura 11** ($21^{\circ}01'04.8''N$, $89^{\circ}52'31.1''W$), una zona del bosque tropical seco. Cerca al punto de muestreo se encuentra una torre de monitoreo ecohidrológico que cuenta con distintos sensores

para la medición de agua, temperatura, presión atmosférica, flujos de CO₂, entre otros (Uuh-Sonda et al., 2022).

2.1.1.4. Hunucmá, Yucatán

Hunucmá es uno de los 106 municipios de Yucatán, ubicado en la región norponiente, tiene una superficie de 840.52 km² y una población total de 35,137 habitantes (INEGI, 2010; INAFED, 2021). Toda la superficie del municipio es plana, considerada como una llanura de barrera. Posee un clima cálido-semiseco, con una temperatura media anual de 26°C y una precipitación media anual de 1,200 mm (INAFED, 2021). El puerto principal de Hunucmá es Sisal, a ~23 km de la cabecera municipal. Dentro de las actividades económicas principales se encuentra la agricultura, a la cual se destina alrededor del 3% de la superficie, con una variedad de sembradíos como chile verde, avena, tomate, entre otros (INEGI, 2010). El último punto de recolección de suelos, marcado como **S3** en la **Figura 11** (21°01'04.8"N, 89°52'31.1"W) se encuentra en la periferia de la cabecera municipal, rodeado por algunas viviendas y campos de cultivo.

2.1.2. Equipos

2.1.2.1. Muestras de partículas de aerosol

Para el muestreo de partículas de aerosol se utilizó un muestreador de alto volumen Hi-Vol. El Hi-Vol es capaz de aspirar aire de la atmósfera a un flujo constante por un determinado tiempo. El muestreador consta de tres componentes principales para su funcionamiento: a) un motor y un controlador de flujo que permite succionar el aire de manera controlada, b) un portafiltro donde se pueden instalar los filtros para la toma de muestra, y c) un cabezal o impactador que separa las partículas de aerosol por tamaño previo a que impacten en el filtro. Este equipo puede muestrear PM₁₀, PM_{2.5} (partículas con un tamaño menor a 10 µm y 2.5 µm, respectivamente) y PST (partículas suspendidas totales), dependiendo del cabezal que se utilice.

Para el presente trabajo se utilizaron dos muestreadores Hi-Vol (uno para cada sitio de muestreo) marca General Metal Works (GMW) modelo 1200 PM₁₀, (**Figura 13**). Si bien los muestreos fueron por 24 horas, se tomaron muestras cada 12 horas en

los días en los que el pronóstico satelital indicaba posibles intrusiones de polvo del Sahara. Los equipos se operaron con un flujo de 1.1 m³/min, se usaron cabezales para PM₁₀ y se utilizaron filtros de celulosa de 8"x10" (marca Tisch, modelo TE 241). Se utilizaron filtros de celulosa debido a que materiales como la fibra de vidrio y cuarzo podrían provocar ruido en las señales analíticas de las técnicas de análisis químico empleadas. Se recolectaron 18 muestras en Cozumel y 18 muestras en Sisal, obteniéndose un total de 36 muestras. Al término del periodo de muestreo, los filtros fueron retirados del equipo y cada uno se dividió en 5 partes para realizar los distintos análisis, tal y como se muestra en la **Figura 14**. Dos cuartos del filtro fueron utilizados para este estudio: un cuarto se utilizó para realizar análisis por ICP-MS y otro cuarto se dividió nuevamente en dos, un octavo se utilizó para realizar análisis por IEC, y el otro por XRD y XRF. Los otros dos cuartos fueron enviados a otros laboratorios como parte de colaboraciones, un cuarto fue enviado a The Caribbean Aerosol Community y otro cuarto para análisis de metagenómica y bacterias cultivables en el Laboratorio de Estudios Ecogenómicos de la Unidad Académica de Ciencias y Tecnología de la UNAM en Yucatán, Sede Parque Científico Tecnológico.



Figura 13. Muestreador de alto volumen Hi-Vol PM₁₀

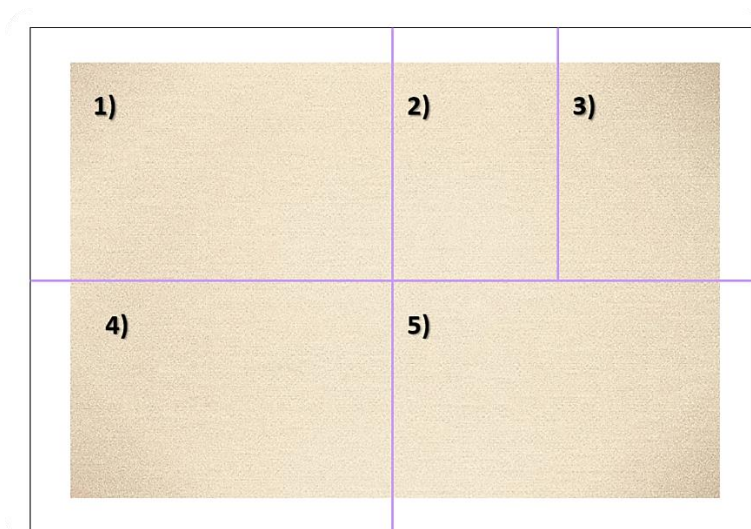


Figura 14. División de filtros de celulosa: (1) para análisis por ICP-MS, (2) para análisis por IEC, (3) para análisis por XRF y XRD, (4) para The Caribbean Aerosol Community, y (5) para análisis de metagenómica y bacterias cultivables

2.1.2.3. Muestras de suelo

Se tomaron muestras superficiales de suelos (dentro de los primeros 5 a 10 cm de profundidad) con ayuda de una espátula de acero inoxidable, una en cada uno de los puntos mencionados anteriormente (**S1**, **S2** y **S3**, **Figura 11**). Las muestras fueron almacenadas en bolsas marca Ziploc y transportadas hacia el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático para tratamiento y análisis. Una vez en el laboratorio, las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente hasta que alcanzaron valores de humedad por debajo del 10%. Posteriormente, y previo a ser llevado al sistema de generación de aerosol, las muestras fueron cribadas utilizando un tamiz de latón Cole-Parmer, modelo YV-59980-10 (**Figura 15**), con una apertura nominal de 425 μm .



Figura 15. Tamiz de latón Cole Cole-Parmer (YV-59980-10) y muestra de suelo.

Sistema de generación de aerosol

Para poder generar partículas de aerosol que pudieran ser colectadas en filtros adecuados para su análisis químico, se utilizó un sistema de generación de aerosol en seco similar al desarrollado por Ladino & Abbatt (2013). El sistema de generación de aerosol en seco consta de varias partes, que se muestran en la **Figura 16**. El sistema está formado por un recipiente de acero inoxidable con forma de matraz Erlenmeyer de 250 mL donde se vierte una pequeña cantidad de muestra (aproximadamente 2 g) y una barra de agitación. El recipiente metálico cuenta, además, con cuatro puertos laterales interconectados con un tubo por el cual se inyecta un flujo de aire comprimido. La entrada de aire comprimido y la agitación, que se lleva a cabo utilizando una parrilla magnética, provocan turbulencia dentro del recipiente, lo cual libera partículas de aerosol hacia la parte superior. Posteriormente las partículas de aerosol generadas se dirigen a un envase de cristal de 20 L, el cual está conectado también a una entrada de aire externo acoplada a un filtro HEPA (High Efficiency Particulate Air, por sus siglas en inglés) y, un tubo que permite la salida de las partículas de aerosol. Tiene como función brindar un suministro de partículas más estable y regular su concentración, al permitir la mezcla de la fuente externa de aire filtrado y la muestra aerosolizada. Finalmente, el tubo de salida se conecta a un equipo de recolección de partículas de aerosol. En este caso, se utilizaron un MiniVol (**Figura 16, a**) y un MOUDI (Micro Orifice

Uniform Deposit Impactor, por sus siglas en inglés) (**Figura 16, b**), los cuales se describen a continuación.

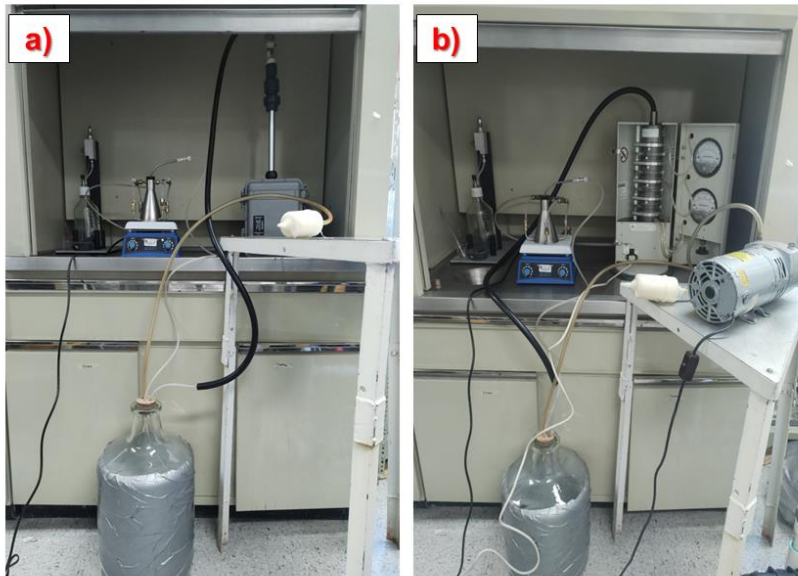


Figura 16. Sistema de generación de aerosol en seco y equipos de muestreo de partículas de aerosol: a) MiniVol y b) MOUDI

MiniVol

El MiniVol es un muestreador de aire de bajo volumen, con un funcionamiento similar al del Hi-Vol. Se utilizó un MiniVol TAS que posee un cabezal removible, adaptable para coleccionar partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Al fondo del cabezal se encuentra un portafiltro donde se pueden colocar filtros de 47 mm de diámetro de distintos materiales. La parte principal del MiniVol cuenta con una bomba que extrae 5 L/min, un panel de control y, una batería extraíble que puede alimentar al equipo durante 24 horas, lo que lo habilita como portátil. La bomba succiona el aire a través del cabezal que permite pasar sólo a las partículas con tamaño menor a $10 \mu m$ (PM_{10}) o $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$), según sea el caso, hacia el filtro donde se coleccionarán. Las partículas con un tamaño mayor al diámetro de corte permanecen en un plato de impacto engrasado dentro del cabezal.

El MiniVol fue adaptado al final del sistema de generación de aerosol en seco. Cada muestra de suelo se recolectó por duplicado utilizando cabezales de PM_{10} y filtros de teflón de 47 mm. Las primeras repeticiones de las muestras, se coleccionaron por

alrededor de 10 a 30 minutos, y se utilizaron para los análisis por XRF e IEC. Las segundas repeticiones se colectaron en un intervalo de 60 a 120 minutos y se utilizaron para los análisis por ICP-MS. El tiempo de recolección dependió de cada muestra, para obtener una cantidad suficiente para la realización de cada análisis.

MOUDI

Este equipo es un impactador en cascada con ocho etapas, con diferentes diámetros de corte, donde las etapas superiores contienen a las partículas de mayor tamaño. Cada etapa cuenta con un plato de impactación donde se colocan filtros de distintos materiales, de acuerdo al propósito del estudio y tipo de partículas a coleccionar. En la **Tabla 2** se listan los rangos de diámetro aerodinámico que recolecta cada etapa.

Tabla 2. Rangos de tamaño de cada etapa del MOUDI (Marple et al., 1991)

| Etapa | Diámetro aerodinámico (μm) |
|-------|---|
| 1 | 10.0 – 18.0 |
| 2 | 5.6 – 10.0 |
| 3 | 3.2 – 5.6 |
| 4 | 1.8 – 3.2 |
| 5 | 1.0 – 1.8 |
| 6 | 0.56 – 1.0 |
| 7 | 0.32 – 0.56 |
| 8 | 0.18 – 0.32 |

El MOUDI posee una bomba de vacío que succiona 30 L/min de aire a través del impactador en cascada. Las partículas de aerosol suspendidas en el aire chocan con el primer plato de impactación y en el filtro se retienen las partículas con un tamaño mayor al diámetro de corte. Las partículas más pequeñas que el diámetro de corte siguen la línea de flujo y pasan por unos orificios debajo de cada etapa que las direccionan hacia el siguiente plato de impactación, donde se coleccionan las partículas en el rango correspondiente. Conforme se reduce el rango de tamaño de cada etapa también disminuye el tamaño de los orificios que direccionan las partículas. Adicionalmente, el MOUDI cuenta con un rotador que hace girar el impactador para asegurar una distribución uniforme de las partículas coleccionadas en los filtros.

Se colectó una muestra de cada suelo aerosolizado por aproximadamente 30 minutos en filtros de aluminio de 47 mm, utilizando un MOUDI marca MSP, modelo 100R. Posteriormente, se utilizaron estas muestras para el análisis de XRD.

2.1.2.4. Monitoreo de partículas de aerosol

Durante la campaña de mediciones se monitoreó la concentración de partículas de aerosol por medio de dos DustTrak, uno en Cozumel y otro en Sisal. El DustTrak es equipo capaz de medir la concentración másica de las partículas de aerosol en función de su tamaño en tiempo real. Para determinar las concentraciones de las partículas de aerosol el DustTrak aplica el principio de dispersión de un haz de luz láser en cinco diferentes canales. De esta manera, se pueden medir simultáneamente las fracciones PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM_{4.0}, PM₁₀ y PST. Se empleó un DustTrak DRX marca TSI modelo 8533 (**Figura 17**), un modelo portátil, con un flujo de trabajo de 3 L/min. El equipo registra datos de la concentración másica de partículas de 0.1 µm a 15 µm cada 15 minutos (TSI, 2021).



Figura 17. DustTrak (TSI, 2021)

2.2. Datos meteorológicos

2.2.1. Estaciones meteorológicas

Los datos meteorológicos de Sisal fueron descargados de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM (<https://www.ruoa.unam.mx/>), que cuenta con un observatorio en el Instituto de Ingeniería de la Unidad Académica Sisal. Por otro lado, los datos de Cozumel se obtuvieron de la Estación Meteorológica Automática de Superficie (EMAS), a cargo de la Secretaría de Marina. La EMAS de Cozumel se encuentra ubicada en 20°30'24.67"N,

86°57'22.27''W, y los datos fueron descargados a través de la Plataforma Nacional de Transparencia (<http://www.plataformadetransparencia.org.mx>).

2.2.2. Radiosondeo atmosférico

Adicionalmente a los datos meteorológicos en superficie, se obtuvieron datos meteorológicos en perfil vertical a partir de un radiosondeo atmosférico. Los radiosondeos atmosféricos son tomados en lugares específicos alrededor del mundo diariamente a las 00 UTC y 12 UTC, usando radiosondas montadas en globos meteorológicos (UTC hace referencia a Coordinated Universal Time). Los globos meteorológicos están hechos de neopreno de alta calidad y rellenos de helio, pueden alcanzar alturas alrededor de los 40,000 m. Las radiosondas proporcionan información de variables meteorológicas como presión, temperatura, HR, punto de rocío, dirección del viento, entre otros. Los datos de sondeo atmosféricos se obtuvieron a través del portal del Departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Wyoming, que proporciona datos a nivel mundial (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Seleccionando el periodo de campaña de muestreo y la estación 76595 Cancún, ubicada en Cancún, Quintana Roo.

2.2.3. Modelo HYSPLIT

Para determinar el sitio de origen aproximado de las masas de aire que llegaron hasta la zona de estudio se utilizó el modelo HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory) desarrollado por la NOAA. Se calcularon las retro-trayectorias para Cozumel y Sisal para 13 días a 250 m, 500 m y 1000 m sobre el nivel del suelo. Para ello se utilizó el modelo Global Forecast System (GFS) en su versión más reciente FV3, con una resolución de ~13 km dentro de los primeros 16 días de pronóstico (NCEI, 2022).

2.2.4. Imágenes satelitales

Para monitorear el comportamiento de las masas de aire cargadas de polvo mineral provenientes del norte de África (también llamadas plumas) se hizo uso de imágenes satelitales. Las imágenes satelitales fueron obtenidas a través de los

datos recabados por el satélite GOES-16 (Geostationary Operational Environmental Satellite – 16). GOES-16 posee 16 bandas espectrales en los rangos del infrarrojo y visible que proporcionan información cada 5 minutos. Las imágenes a color real fueron procesadas a través del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT).

2.3. Análisis químico

2.3.1. Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

Una de las técnicas empleadas para el análisis de la composición química fue ICP-MS, un tipo de espectrometría de masas capaz de detectar un gran número de metales y no metales. Consta de un sistema de introducción de muestra, una fuente de iones (ICP), un espectrómetro de masas (MS) y un detector (Wilschefski & Baxter, 2019). Las muestras líquidas se colocan en el sistema de introducción de muestra, un nebulizador donde se aerosoliza, luego pasa a una cámara de pulverización que filtra las gotas de aerosol grandes y sólo permite el paso de las más finas hacia el plasma. El plasma de argón (ICP) actúa como una fuente de ionización “fuerte” ya que ioniza completamente la mayoría de las moléculas de la muestra. A medida que las gotas de la muestra ingresan al plasma de alta temperatura se evaporan y absorben tanta energía que se liberan electrones, formando un ion cargado positivamente. Estos iones son dirigidos al analizador de masas por medio de unos lens (una superficie cargada positivamente que impulsa a los iones positivos por la óptica del equipo). El analizador separa los iones de acuerdo con su relación masa/carga (m/z). El equipo utiliza diferentes analizadores de masas, entre los más comunes están el cuadrupolo (Q) y el tiempo de vuelo (TOF). Finalmente, los iones son detectados por un multiplicador de electrones y se transmite la señal analítica al equipo de adquisición de datos (Thomas, 2008; Wilschefski & Baxter, 2019).

El análisis de las muestras por ICP-MS se llevó a cabo bajo dos métodos distintos de digestión. En el primer método se realizó una digestión fuerte para cuantificar algunos de los elementos huella de polvo mineral (Al, Fe y Ti). La digestión y análisis

se llevaron a cabo en el Laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM. Por otra parte, para cuantificar a los elementos menores y traza, se llevó a cabo una digestión con ácido nítrico, asistida por microondas. Este análisis se realizó en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Para el primer método de digestión ácida se utilizó un digestor UltraWAVE (Milestone). Se utilizó una fracción de aproximadamente 2.3 cm^2 de cada filtro de celulosa para las muestras de aerosol y el filtro completo de teflón para las muestras de suelo. Cada filtro se colocó en un vial de teflón para adicionar 4 mL de agua regia invertida (3 mL HNO_3 :1 mL HCl) y 1 mL de HF grado ultrapuro. Posteriormente se inició la digestión asistida por microondas durante 40 minutos. A continuación, las muestras fueron evaporadas, para retirar el exceso de ácidos, en una parrilla de calentamiento. Se adicionó entonces 1 mL de HCl por duplicado, con sus respectivas evaporaciones. Finalmente se enfriaron las muestras y aforaron a 10 mL con una solución 2% de HNO_3 , se filtraron y etiquetaron. Las mediciones se realizaron con un espectrómetro ICP-MS marca Thermo Fisher Scientific modelo iCAP-RQ. Se realizó una curva de calibración con ocho puntos (0 – 2000 $\mu\text{g/L}$), a partir de una solución multielemental certificada de la marca High Purity Standards (QCS-26 elements). Se utilizó además el material de referencia 1648a – Urban particulate matter, para el control de calidad.

En el segundo método se realizó una digestión asistida por microondas con un sistema MARS Xpress (CEM Corporation), se utilizó únicamente para las muestras de aerosol atmosférico. Las digestiones fueron realizadas tomando rectángulos de aproximadamente 75 cm^2 de cada filtro de celulosa. Se utilizó una mayor fracción de filtro debido a que los elementos menores y traza se encuentran en menores concentraciones. Estos rectángulos fueron recortados en fragmentos más pequeños, se colocaron en vasos de teflón, y posteriormente se agregaron 10 mL de HNO_3 al 40%. Se dejó reposar durante 30 minutos y se llevaron los vasos al horno de microondas para comenzar la digestión. Luego de la digestión se dejaron enfriar las muestras y se filtraron con membranas de nylon con poro de $0.45 \mu\text{m}$ (Target2™, Thermo Scientific). Finalmente, las muestras fueron traspasadas a matraces y aforadas a un volumen final de 25 mL con HNO_3 al 2%. De igual manera,

para el análisis se utilizó un espectrómetro iCAP-RQ, empleando una adaptación del método EPA IO-3.5 para la determinación de metales. La calibración se realizó a través de una disolución stock de un estándar multielemental EPA 200.8 High-Purity Standards, HPS®. El intervalo de trabajo elegido para la curva de calibración fue de 0.5 a 100 g/L, con nueve puntos de calibración. Se lograron cuantificar 13 isótopos: ^9Be , ^{52}Cr , ^{55}Mn , ^{59}Co , ^{58}Ni , ^{65}Cu , ^{75}As , ^{82}Se , ^{95}Mo , ^{107}Ag , ^{110}Cd , ^{123}Sb , ^{208}Pb . En este caso no se contó con un material de referencia para el control de calidad.

2.3.2. Fluorescencia de rayos X (XRF)

Para identificar los elementos y determinar sus concentraciones totales, complementando la información obtenida por ICP-MS, se utilizó la fluorescencia de rayos X. Ésta es una técnica no destructiva que provee información de la composición elemental tanto de manera cualitativa como cuantitativa. La XRF se basa en la excitación de los átomos de una muestra por una fuente de rayos X primaria, seguida de la emisión de fotones con energía característica de cada elemento (Streli et al., 1999). La energía a la que se expone la muestra es suficiente para desprender un electrón de uno de los orbitales internos del átomo. El átomo recupera estabilidad al llenar el vacío dejado el orbital interno con un electrón de uno de los orbitales de mayor energía. Al caer un electrón de un estado de mayor energía a uno de menor energía libera un fotón. La energía del fotón emitido es igual a la diferencia específica de energía entre los dos estados cuánticos del electrón. La determinación de esta energía (o longitud de onda) permite un análisis cualitativo, mientras que la determinación del número de fotones característicos emitidos permite un análisis cuantitativo (Streli et al., 1999; Adams, 2005).

Para este estudio se empleó un instrumento desarrollado por Espinosa et al. (2012) en el Laboratorio de Aerosoles del Instituto de Física, UNAM. Consta de una fuente de rayos X primaria con ánodos de Rh y W; un sistema de posicionamiento de muestra que permite analizar varias muestras sin necesidad de romper el vacío en la cámara del espectrómetro donde se irradiarán; y un detector Si-PIN XR-100CR. Para la calibración del detector se utilizan 31 patrones de película delgada depositados sobre un sustrato de Mylar con un espesor de 3 μm (Micromatter,

Vancouver, Canadá). Junto con las muestras, para asegurar el correcto funcionamiento del equipo en cada análisis, se coloca un patrón de hierro cuya concentración es de $42 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, con una incertidumbre del 5%. Para las muestras aerosolizadas de suelo se utilizó todo el filtro de teflón, y para las muestras de partículas de aerosol se utilizó 1/8 de cada filtro de celulosa. Debido a que es una técnica no destructiva, se pudieron reutilizar los filtros para realizar otros análisis.

2.3.3. Difracción de rayos X (XRD)

Con la técnica de XRD se puede obtener información de la composición mineralógica de una muestra a partir de su patrón de difracción (Suryanarayana & Norton, 1998). Las estructuras cristalinas se caracterizan por una disposición de átomos (o iones) sistemática y periódica en una matriz tridimensional. Gracias a este arreglo sistemático cada cristal contiene planos de átomos separados por una distancia constante característica de cada especie cristalina (Whittig & Allardice, 2018). El fenómeno de difracción de rayos X implica la dispersión de esta radiación por los átomos dentro del cristal. Al no ser lo suficientemente energética para ionizar a los electrones, la radiación es remitida como una nueva radiación X con la misma energía, pero con un diferente ángulo relacionado con los planos cristalinos. El difractómetro detecta picos en ángulo exacto donde ocurre la mayor interferencia constructiva de ambos rayos X (es decir que la señales se suman y por lo tanto la señal total se amplifica), para las diferentes distancias del arreglo cristalino. De esta manera se genera un patrón de difracción. Dado que no hay dos minerales que tengan exactamente las mismas distancias interatómicas en las tres dimensiones existe un patrón de difracción distintivo para cada mineral (Suryanarayana & Norton, 1998; Whittig & Allardice, 2018).

Se realizó un análisis cualitativo para las muestras de aerosol y uno cuantitativo para las muestras de suelo por XRD, en el Laboratorio de Difracción de rayos X del Instituto de Geología, UNAM. Para ello se empleó un difractómetro Empyrean, mostrado en la **Figura 18**, con voltaje de operación de 45 kV, una corriente de 40 mA, equipado con un filtro de níquel, tubo de cobre de foco fino y un detector PIXcel 3D (Malvern Panalytical, Malvern, UK). La cuantificación se realizó utilizando el

método Rietveld, implementando el software HIGHScore v4.5 y las bases de datos de ICDD (International Center for Diffraction DATA) y ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). Se recabaron con una escobilla en un solo portafiltros, adecuado para el análisis por XRD, las partículas de suelo colectadas en las etapas del MOUDI. Por otro lado, para las muestras de aerosol fue necesario hacer una extracción de las partículas recolectadas para poder observar las señales de los minerales sin interferencia del material del filtro. Se cortó el cuarto de filtro utilizado para XRF en dos partes, una para análisis XRD y otra para IEC. La parte designada para XRD se dividió de nuevo en dos partes para realizar extracción con un disolvente polar y uno apolar, teniendo así un dieciseisavo del filtro original para cada disolvente. Además, se clasificaron las muestras de cada costa de la península en dos grupos, uno relacionado a los días donde se observaron intrusiones de polvo del Sahara a través de datos satelitales y otro donde no se observaron intrusiones, teniendo así un total de ocho mezclas (**Tabla 3**). Cada mezcla se colocó en un sonicador por una hora y, posteriormente, en un agitador orbital a 350 rpm por seis horas para la extracción del material particulado. Posteriormente, se retiraron los pedazos de filtro visibles y se evaporó el disolvente de la disolución, para después colocarse en un portamuestras de cero background para ser analizadas en el difractor.

Tabla 3. Mezclas preparadas para la extracción del material particulado previo al análisis por XRD

| Sitio de muestra | Tipo de muestra | | Disolvente | |
|------------------|--|--|------------|----------|
| | con intrusión de Polvo del Sahara | sin intrusión de Polvo del Sahara | metanol | n-hexano |
| Cozumel (A1) | X | | X | |
| | X | | | X |
| | | X | X | |
| | | X | | X |
| Sisal (A2) | X | | X | |
| | X | | | X |
| | | X | X | |
| | | X | | X |



Figura 18. Difractómetro Empyrean, con detector PIXcel 3D

2.3.4. Cromatografía de intercambio iónico (IEC)

La IEC es una técnica analítica útil para la separación y determinación cuantitativa de compuestos iónicos en una muestra. Se basa en las propiedades de carga eléctrica de las especies químicas para la separación de las mismas (Skoog et al., 2014). Como fase estacionaria, en la IEC se utiliza una resina de intercambio iónico. Las resinas de intercambio iónico sintéticas son polímeros químicamente inertes de alta masa molecular que contienen grandes números de grupos funcionales ionizables por molécula. Para separar los iones positivos (cationes) se utilizan resinas con grupos ácidos y para separar los iones negativos (aniones) las resinas contienen grupos básicos (Haddad, 2001; Skoog et al., 2014). Por otro lado, la fase móvil consiste en un sistema amortiguador (buffer). Al cambiar el pH de trabajo las especies iónicas del buffer y de la muestra compiten por los sitios de unión de la resina, de esta manera se pueden desorber o separar los componentes (Skoog et al., 2014)

El análisis IEC se realizó en el Laboratorio de Aerosoles Atmosféricos del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM. Previo al análisis IEC se extrajeron las partículas de aerosol del octavo de filtro de celulosa asignado, y del filtro de teflón, en el caso de las muestras de suelo. Se cortó cada filtro en pequeños pedazos y se colocaron en 10 mL de agua desionizada. Se sonicó esta mezcla durante una hora en un baño ultrasónico, a una temperatura menor a 27°C, y

posteriormente se colocó en un agitador orbital por seis horas a 350rpm. Posteriormente se filtró la mezcla usando acrodiscos para cromatografía iónica de 0.2 μm marca Pall Corporation. Se utilizó un cromatógrafo Dionex ICS-1500 (**Figura 19**), una columna de intercambio iónico Dionex IonPac AS23 y una solución 4.5mM $\text{Na}_2\text{CO}_3/0.8 \text{ mM NaHCO}_3$ con un flujo de 1mL/min para la determinación de aniones; mientras que para identificar los cationes se empleó una columna Dionex IonPac CS12A y una solución 20 mM de CH_4SO_3 con un flujo de 1 mL/min. El cromatógrafo cuenta con una celda de conductividad de flujo que mide la conductancia eléctrica de cada ion (μS). Para la realización de las curvas de calibración se emplearon estándares certificados de cada ion de interés, con hasta diez puntos de calibración.



Figura 19. Cromatógrafo Dionex ICS-1500

3. Resultados y discusión

3.1. Series de tiempo

Se realizaron series de tiempo de las condiciones meteorológicas y de la concentración de PM₁₀ para ambos sitios de muestreo de aerosol atmosférico (i.e., A1 y A2) con el propósito de observar de manera gráfica el comportamiento y anomalías de cada variable medida.

En la **Figura 20** se muestran las series de tiempo de las variables medidas en superficie (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica) para Cozumel (A1). Se observaron patrones repetitivos para cada día (ciclos diurnos) tanto en la temperatura como en la humedad relativa (**Figuras 20a y 20b**). La temperatura osciló entre los 25°C y 34°C, con un promedio de 29.6°C. La humedad relativa promedio fue de 81.2%, y se mantuvo entre 57% y 96%. Por otra parte, no se observó un patrón evidente en la velocidad del viento y presión atmosférica. La velocidad del viento tuvo la mayor fluctuación diaria de las cuatro variables meteorológicas medidas (**Figura 20c**). Entre el 8 y 9 de julio se alcanzaron las mayores velocidades de viento, con un máximo de 34.7 km/h. Finalmente, la presión atmosférica osciló entre los 1011 hPa y 1019 hPa (**Figura 20d**).

La serie de tiempo de la concentración de partículas de aerosol menores a 10 µm (PM₁₀) (**Figura 21**), muestra posee una alta variabilidad. A simple vista se pueden notar varios picos de concentración, y dos incrementos significativos del 9 al 12 de julio y del 15 al 16 de julio. La concentración promedio de PM₁₀ a lo largo de la campaña en Cozumel fue de 32.8 µg/m³, con un máximo de 70 µg/m³. Más adelante se discute a detalle el análisis estadístico realizado con los datos de las series de tiempo para detectar las posibles intrusiones de polvo del Sahara.

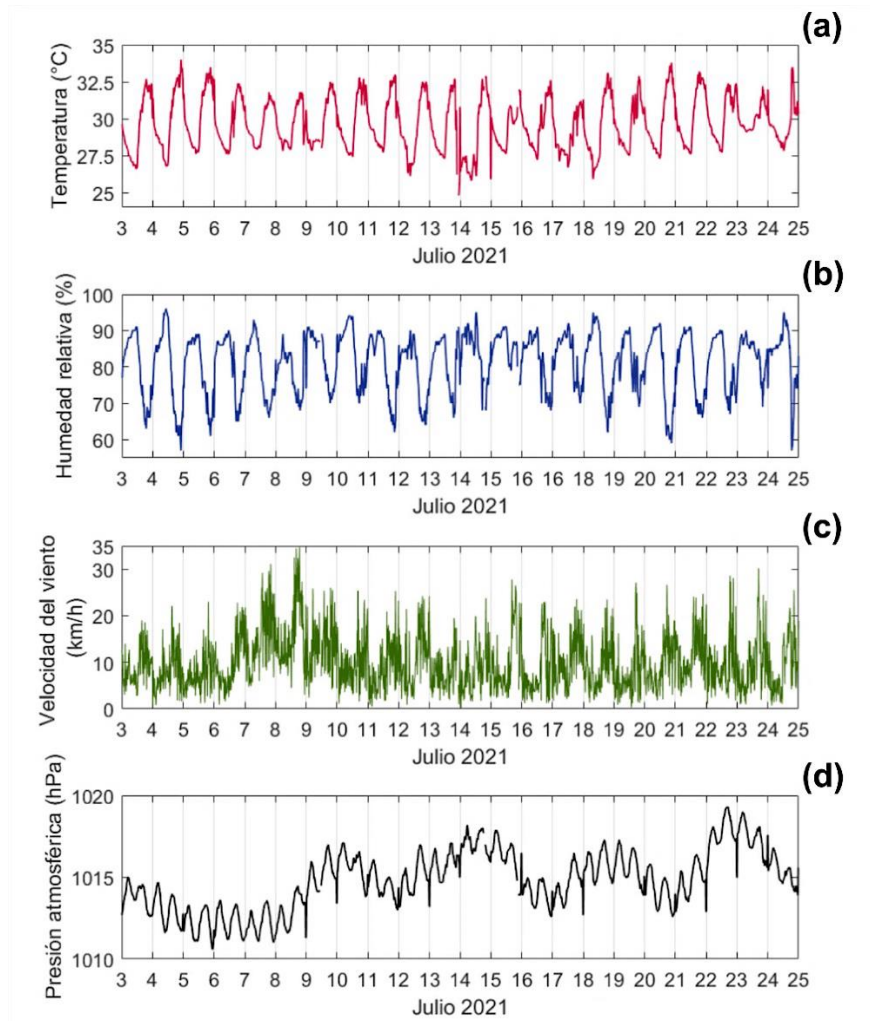


Figura 20. Series de tiempo de (a) temperatura, (b) humedad relativa, (c) velocidad del viento y (d) presión atmosférica en superficie, para A1 (Cozumel). Datos obtenidos de la Estación Meteorológica Automática de Superficie (EMAS).

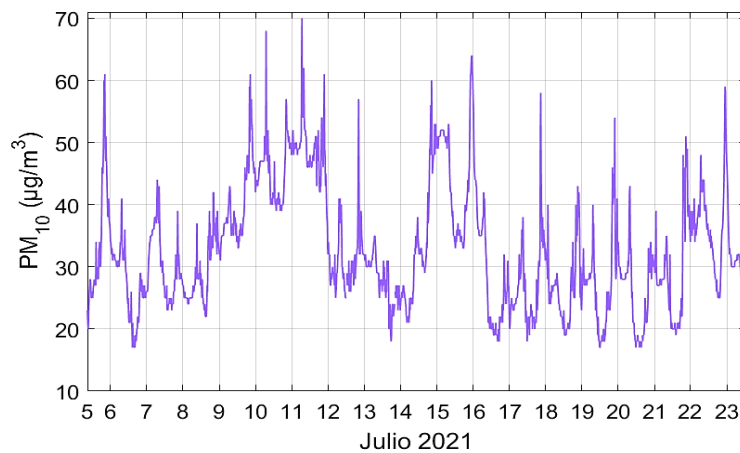


Figura 21. Serie de tiempo de PM₁₀ para A1 (Cozumel). Datos medidos con el DustTrack.

De manera similar, en la **Figura 22** se presentan las series de tiempo de las condiciones meteorológicas en superficie para el segundo sitio de muestreo de aerosol atmosférico Sisal (A2). La temperatura promedio fue de 27°C, y se mantuvo entre los 21.5°C y 34°C durante el periodo de mediciones (**Figura 22a**). Mientras que la humedad relativa tomó valores entre 44% y 99%, con un promedio de 85% (**Figura 22b**). Tanto la temperatura como la humedad relativa presentan ciclos diurnos, como se observó en el sitio A1. En Sisal la velocidad del viento tuvo una menor variación comparado con Cozumel como se puede ver en la **Figura 22c**, en este caso no se aprecian a simple vista incrementos o decrementos significativos, ni un patrón regular diario. Los valores de velocidad del viento van de 1 km/h a 50 km/h. Por último, la presión atmosférica osciló entre 1008 hPa y 1019 hPa (**Figura 22d**), con una caída de presión entre el 6 y 9 de julio, y con ligeros incrementos a lo largo del período de estudio.

En la **Figura 23** se muestra la serie de tiempo de PM₁₀ de Sisal, donde se evidencian tres periodos con un aumento considerable de la concentración másica. El primero del 9 al 12 de julio, el segundo del 15 al 17 de julio, y el tercero del 22 al 23 de julio. Cabe destacar que las fechas del primer y segundo incremento coinciden con la serie de tiempo de Cozumel. El tercer incremento, presenta el máximo de toda la serie con 71 µg/m³. En promedio la concentración de PM₁₀ en Sisal fue de 29 µg/m³.

Los máximos de concentración encontrados en este estudio son menores que los reportados en años anteriores. En julio de 2017 y 2018 las máximas concentraciones observadas en Mérida fueron de ~92 µg/m³ y 135 µg/m³, respectivamente (Ramirez-Romero et al., 2021). Mientras que en el 2020 se llegó a un máximo de 317 µg/m³ derivado de un evento extremo de transporte de polvo africano (RUOA, 2020). Hasta el momento no es posible predecir con antelación la intensidad de concentración de las plumas de polvo del Sahara con antelación, por lo que es importante planear monitoreos constantes de material particulado, o en su defecto anualmente durante el mes de julio, para asegurar la captura de eventos de interés y analizar la variabilidad interanual.

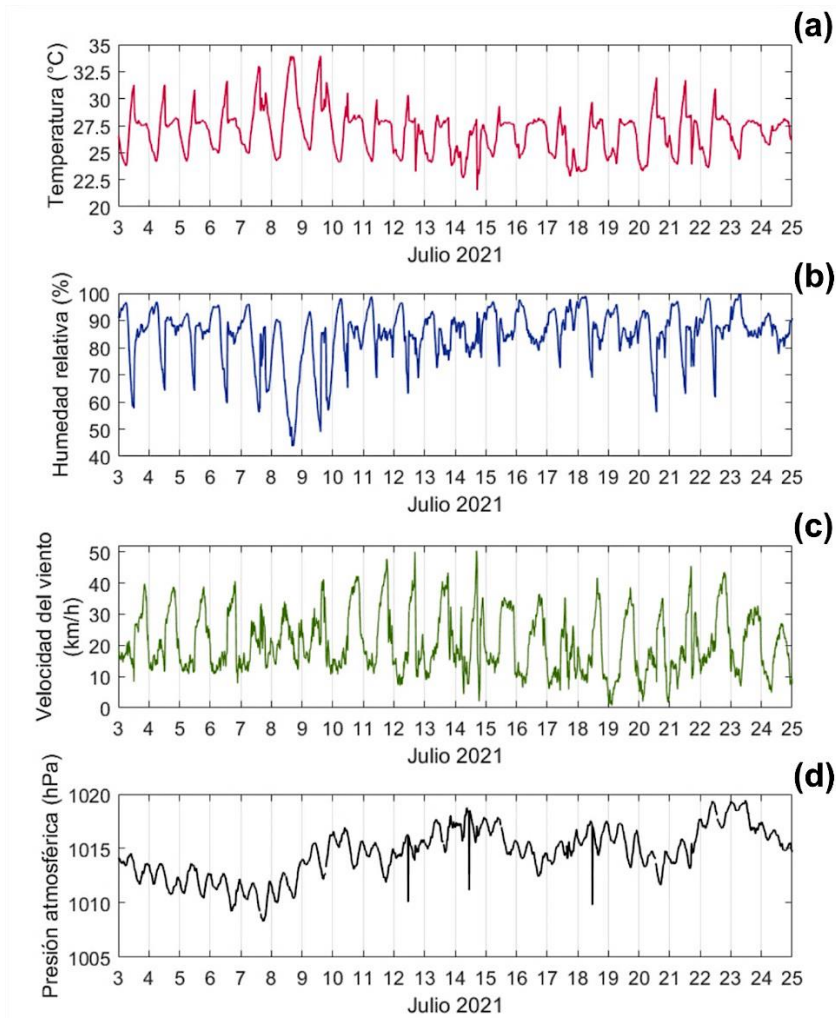


Figura 22. Series de tiempo de (a) temperatura, (b) humedad relativa, (c) velocidad del viento y (d) presión atmosférica en superficie, para A2 (Sisal). Datos obtenidos de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA).

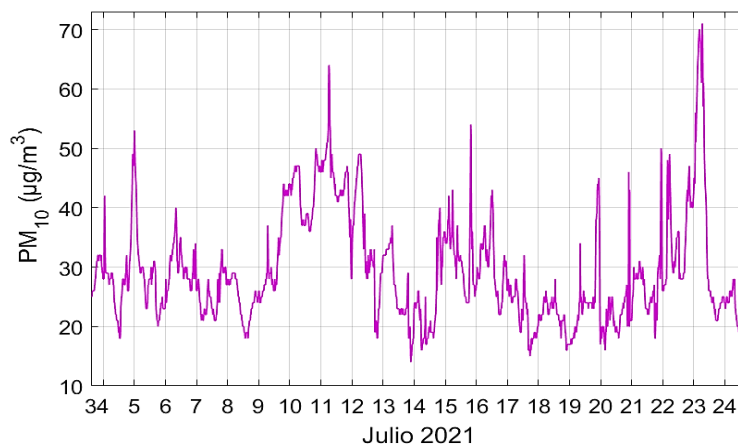


Figura 23. Serie de tiempo de PM_{10} para A2 (Sisal). Datos medidos con el DustTrack.

3.2. Identificación de las intrusiones de polvo del Sahara

Para identificar estadísticamente los picos de concentración másica de PM₁₀ asociados a posibles intrusiones de polvo de Sahara se utilizó como herramienta el cálculo del percentil 75. Un percentil es una medida estadística que divide una distribución ordenada de datos en 100 partes iguales, de tal manera que el percentil 50 es igual a la mediana de los datos (Wilks, 2019). El valor del percentil 75 representa entonces el valor por debajo del cuál se encuentra el 75% de los datos.

Para el cálculo del percentil 75 se utilizaron los promedios de concentración másica de PM₁₀ cada 24 horas desde las 12:00 p.m. a las 12:00 p.m. del día siguiente. Esto con el fin de que coincidiera con las muestras de partículas de aerosol, que fueron tomadas cada 12, 24 y 48 horas, realizando el cambio de filtro a las 12:00 p.m. (y a las 12:00 a.m. en el caso de las muestras de 12 horas). En la **Tabla 4** se muestran el percentil 75 para Cozumel (A1) y Sisal (A2). Se consideraron entonces los días donde se presentaron las concentraciones iguales o mayores al valor del percentil 75 como posibles intrusiones de polvo del Sahara. Complementario al percentil 75, también se calculó el percentil 25 (**Tabla 4**). Los valores por debajo del percentil 25 fueron tomados en cuenta como parte de la concentración de fondo de cada lugar.

Tabla 4. Percentiles 75 y 25 calculados para A1 (Cozumel) y A2 (Sisal) durante la campaña de mediciones de julio de 2021.

| | A1 (Cozumel) | A2 (Sisal) |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| Percentil 75 | 37.3 µg/m ³ | 31 µg/m ³ |
| Percentil 25 | 27.1 µg/m ³ | 24.6 µg/m ³ |

Se realizó también una prueba de Kruskal-Wallis para determinar si existen diferencias entre los promedios de concentración másica de PM₁₀. Se decidió emplear la prueba de Kruskal-Wallis por la naturaleza de los datos, dado que no siguen una distribución normal (Shapiro-Wilk p-valor < 0.05). Los resultados de la prueba indican que tanto los promedios de A1, como los promedios de A2 son diferentes, con un 95% de confianza (p-valor < 0.05).

En la **Tabla 5** se coloca la selección de los días con probables intrusiones de polvo africano en color naranja y los días representativos de la concentración de fondo en

color amarillo. Tomando en cuenta lo anterior, la primera intrusión tomó lugar del 9 al 12 de julio de 2021, tanto en A1 como en A2, siendo ésta también la más intensa de las tres probables intrusiones. En A1 la segunda intrusión tuvo una duración de dos días, del 14 al 16 de julio, mientras que en A2 sólo ocurrió entre el 15 y el 16 de julio. La última intrusión ocurrió solamente en A2, del 22 al 23 de julio, y con una menor intensidad comparada con las demás. La selección de días con posibles intrusiones concuerda con los incrementos previamente descritos en la representación gráfica de las series de tiempo de PM₁₀. Por otra parte, los días elegidos dentro de la concentración de fondo varían en cada sitio de muestreo, coincidiendo solamente en dos ocasiones: del 13 al 14 de julio, y del 17 al 18 de julio. Cabe mencionar que en casi todos los casos la concentración promedio para 24 horas de Cozumel (A1) es mayor que en Sisal (A2).

Tabla 5. Concentración másica promedio de PM₁₀ para 24 horas en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal). Los colores naranja y amarillo hacen referencia a: intrusiones de polvo del Sahara y a concentraciones de fondo, respectivamente.

| Fecha | A1(Cozumel) | A2(Sisal) |
|---|------------------------|------------------------|
| 04/07/21 12:00 p.m. – 05/07/21 12:00 p.m. | N/A | 30.9 µg/m ³ |
| 05/07/21 12:00 p.m. – 06/07/21 12:00 p.m. | 34.2 µg/m ³ | 28.2 µg/m ³ |
| 06/07/21 12:00 p.m. – 07/07/21 12:00 p.m. | 28.3 µg/m ³ | 26.7 µg/m ³ |
| 07/07/21 12:00 p.m. – 08/07/21 12:00 p.m. | 26.7 µg/m ³ | 26.3 µg/m ³ |
| 08/07/21 12:00 p.m. – 09/07/21 12:00 p.m. | 33.9 µg/m ³ | 24.7 µg/m ³ |
| 09/07/21 12:00 p.m. – 10/07/21 12:00 p.m. | 44.7 µg/m ³ | 39.9 µg/m ³ |
| 10/07/21 12:00 p.m. – 11/07/21 12:00 p.m. | 47.6 µg/m ³ | 45.3 µg/m ³ |
| 11/07/21 12:00 p.m. – 12/07/21 12:00 p.m. | 38.9 µg/m ³ | 41 µg/m ³ |
| 12/07/21 12:00 p.m. – 13/07/21 12:00 p.m. | 31.1 µg/m ³ | 27 µg/m ³ |
| 13/07/21 12:00 p.m. – 14/07/21 12:00 p.m. | 25.9 µg/m ³ | 20.9 µg/m ³ |
| 14/07/21 12:00 p.m. – 15/07/21 12:00 p.m. | 43.7 µg/m ³ | 30.8 µg/m ³ |
| 15/07/21 12:00 p.m. – 16/07/21 12:00 p.m. | 38.3 µg/m ³ | 31 µg/m ³ |
| 16/07/21 12:00 p.m. – 17/07/21 12:00 p.m. | 24.3 µg/m ³ | 26.3 µg/m ³ |
| 17/07/21 12:00 p.m. – 18/07/21 12:00 p.m. | 27.1 µg/m ³ | 21.7 µg/m ³ |
| 18/07/21 12:00 p.m. – 19/07/21 12:00 p.m. | 27.1 µg/m ³ | 20.9 µg/m ³ |
| 19/07/21 12:00 p.m. – 20/07/21 12:00 p.m. | 27.7 µg/m ³ | 24.6 µg/m ³ |
| 20/07/21 12:00 p.m. – 21/07/21 12:00 p.m. | 25.7 µg/m ³ | 25 µg/m ³ |
| 21/07/21 12:00 p.m. – 22/07/21 12:00 p.m. | 34.4 µg/m ³ | 30.1 µg/m ³ |
| 22/07/21 12:00 p.m. – 23/07/21 12:00 p.m. | 33 µg/m ³ | 44.1 µg/m ³ |
| 23/07/21 12:00 p.m. – 24/07/21 12:00 p.m. | N/A | 23.7 µg/m ³ |

Como parte del análisis estadístico se evaluó también la correlación entre las series de tiempo de las variables meteorológicas y la serie de tiempo de concentración de PM₁₀ de ambos sitios de muestreo de aerosol atmosférico (**Sección 3.1**). Para ello se utilizó el coeficiente de Spearman ya que los datos no siguen una distribución normal. Los coeficientes de correlación (**Figura 24**) muestran que la relación entre las variables analizadas es muy débil. Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación entre ambas series de tiempo de PM₁₀. Se obtuvo un valor estadísticamente significativo de 0.4998, lo que indica una correlación moderada.

La casi nula correlación entre las series de concentración másica de PM₁₀ y su correspondiente serie de velocidad del viento es de especial importancia dado que sugiere que en ambos casos el incremento de partículas de aerosol no está relacionado con un incremento en la velocidad del viento. Este resultado permite suponer que las partículas de aerosol recolectadas en el presente estudio no provienen de una re-suspensión de suelo en la península de Yucatán.

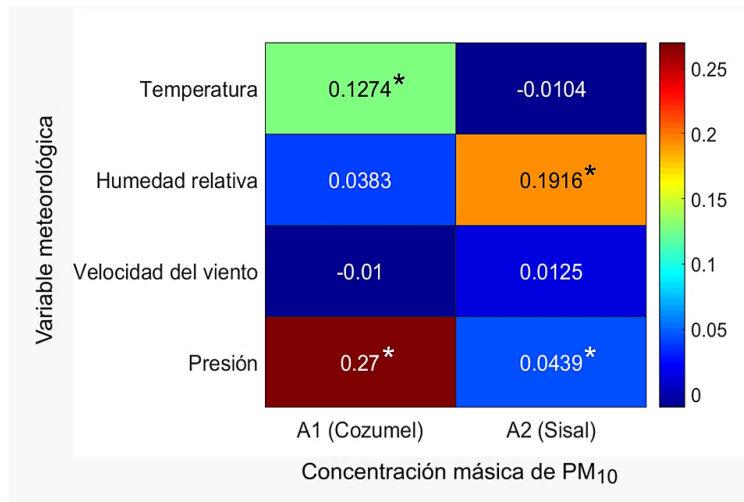


Figura 24. Coeficientes de correlación de Spearman entre las series de tiempo de concentración másica de PM₁₀ y las variables meteorológicas analizadas

** Valores estadísticamente significativos ($p < 0.05$)*

Los resultados obtenidos mediante el análisis gráfico y estadístico de la concentración másica de PM₁₀ están fuertemente ligados a lo observado mediante imágenes satelitales. Gracias a la inspección con datos satelitales se pudo dar seguimiento de las plumas de polvo del Sahara, desde su formación, transporte y dispersión. En las imágenes procesadas durante el periodo de muestreo se detectó

la formación de un total de 11 plumas, las cuales lograron cruzar el océano Atlántico hasta el continente americano, y sólo 6 atravesaron la península de Yucatán. A continuación, se presentan algunos ejemplos de imágenes satelitales en color real en la **Figura 25**. Los incisos **a**, **b** y **c** de la **Figura 25** corresponden a la fecha y hora donde se detectaron plumas de polvo africano sobre la península de Yucatán con mayor claridad e intensidad. Cada una se encuentra dentro de los tres periodos señalados como intrusioniones de polvo del Sahara. Se incluye también en el inciso **d** de la **Figura 25** una imagen del 13 de julio de 2021, un día señalado como representativo de la concentración de fondo tanto en A1 como A2

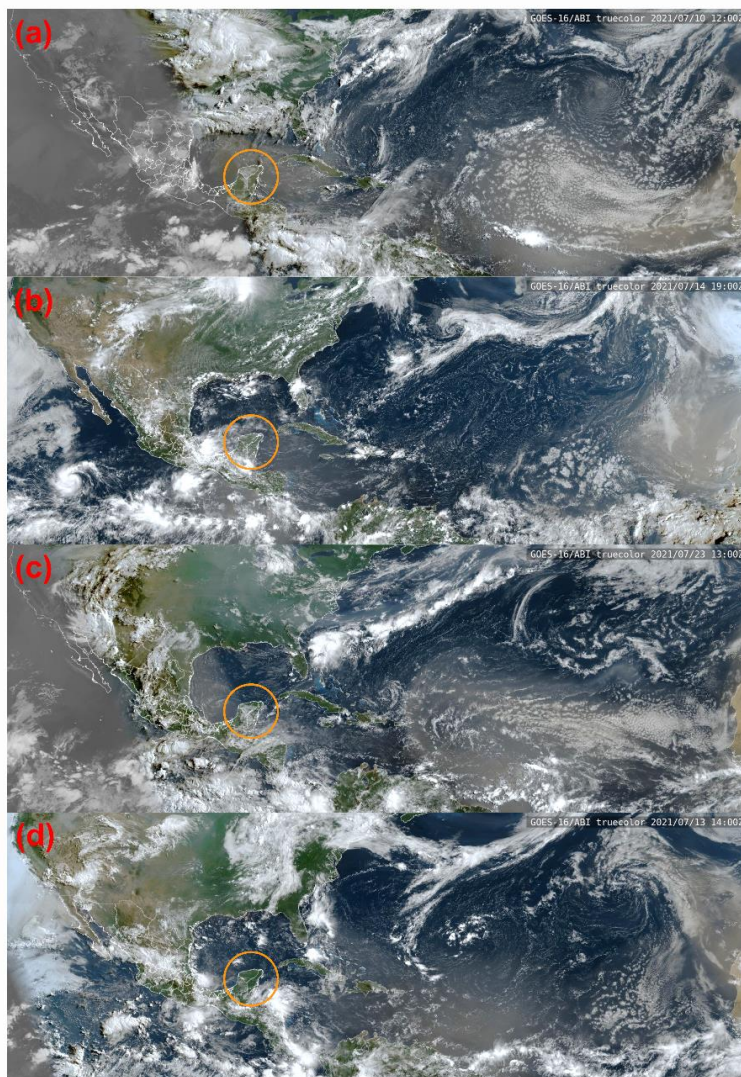


Figura 25. Imágenes del satélite GOES-16 a color real del: (a) 10/07/21 a las 12:00 p.m. (b) 14/07/21 a las 07:00 p.m., (c) 23/07/21 a las 01:00 p.m. y 13/07/21 a las 02:00 p.m. (LANOT, 2022)

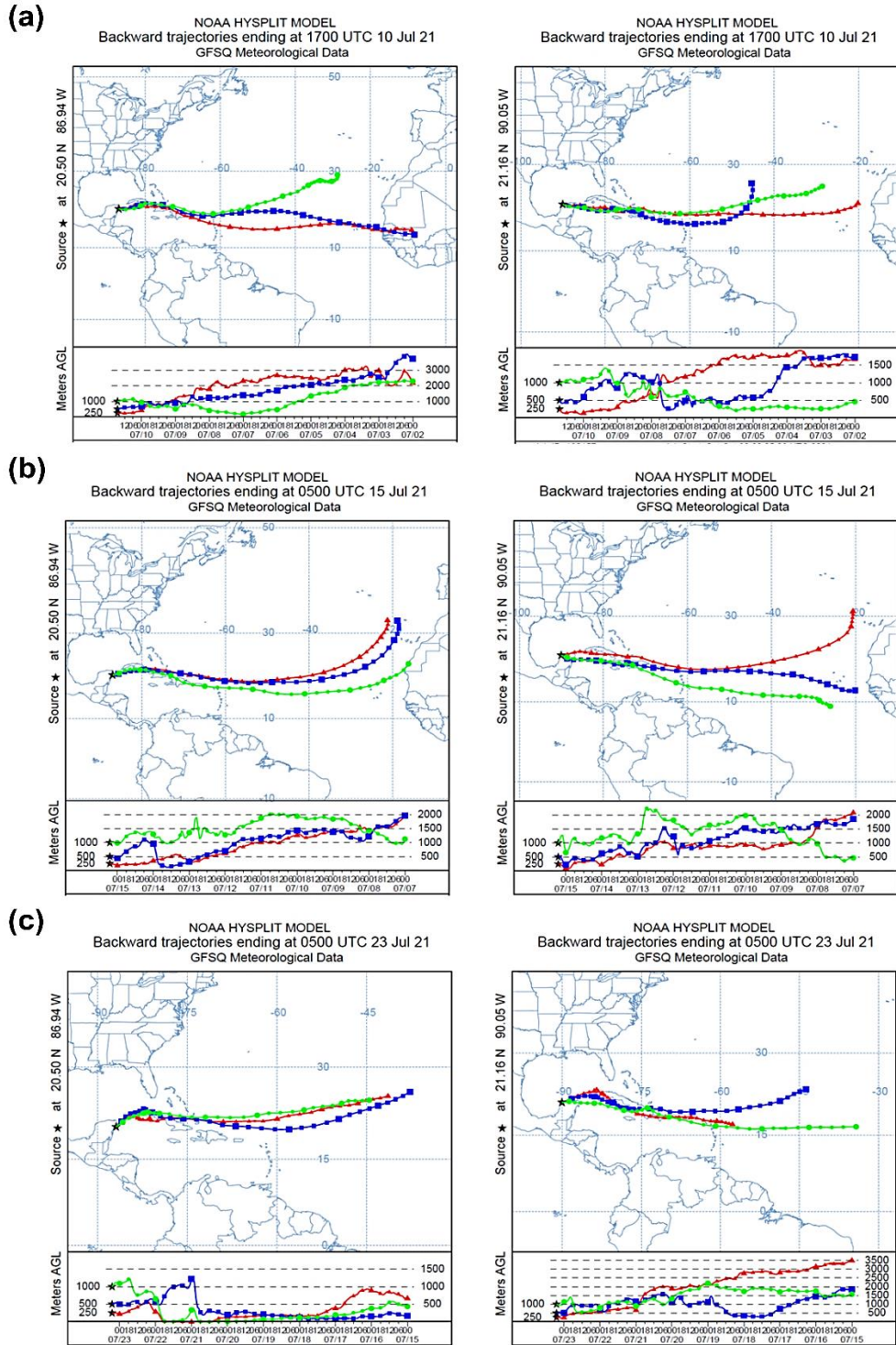


Figura 26. Retro-trayectorias de las masas de aire calculadas para las tres intrusiones de polvo del Sahara: (a) 10/07/2021 a las 12:00 p.m., (b) 15/07/2021 a las 12:00 a.m. y (c) 23/07/2021 a las 12:00 a.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio. Se corrió el modelo HYSPLIT para 13 días a 250 m (rojo), 500 m (azul) y 1000 m (verde) sobre el nivel del suelo.

Otra herramienta útil para determinar la procedencia y trayectoria de la masa de aire que contenía las partículas de aerosol recolectadas, es el cálculo de retro-trayectorias de dichas masas de aire. Se calcularon las retro-trayectorias asociadas a los días previamente seleccionados en las series de tiempo de PM₁₀ para la primera, segunda y tercera intrusión del polvo del Sahara (**Figura 26**). Gracias a estas representaciones visuales se pudo comprobar que la primera (**Figura 26a**) y segunda intrusión (**Figura 26b**) provienen del norte del continente africano o de puntos cercanos, que de acuerdo a las imágenes satelitales son los sitios donde se forma la pluma de polvo del Sahara. De manera concordante con el cálculo de los percentiles, en la última intrusión se puede notar que 13 días antes de llegar a la península de Yucatán, la masa de aire se encontraba sobre el océano Atlántico (**Figura 26c**). Probablemente esta masa de aire provenía de una pluma de polvo que seguía su trayectoria hacia el continente americano. Cabe destacar también que todas las trayectorias, excepto la correspondiente a la tercera intrusión en la costa este (A1, Cozumel), siguen un patrón vertical donde bajan gradualmente de altura hasta llegar al nivel del suelo.

Por último, se realizó una comparación del perfil vertical de la humedad relativa promedio para los días con intrusiones de polvo del Sahara y los seleccionados como fondo. Como se puede ver en la **Figura 27** los patrones promedio poseen diferencias significativas a niveles medios. De acuerdo al estudio de Dunion (2011) el patrón observado en los días de intrusión es característico de una masa de aire perteneciente a la SAL.

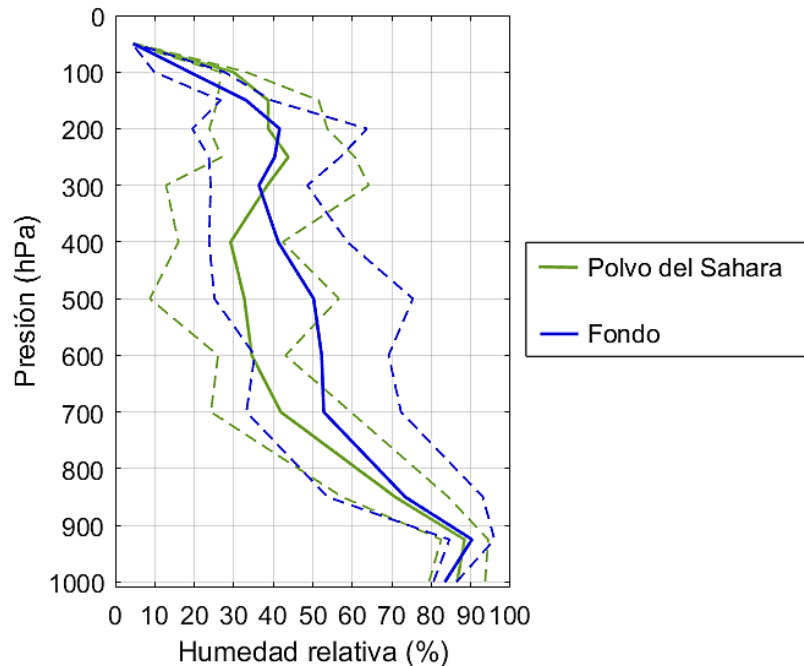


Figura 27. Promedio de radiosondeos para los días registrados con intrusiones de polvo del Sahara (verde) y días con concentración de fondo (azul) en Cancún. Las líneas punteadas representan la desviación estándar asociada a cada promedio.

3.3. Composición química de las partículas de aerosol atmosférico

En esta sección se hablará acerca de la caracterización química de las muestras de aerosol recolectadas en la costa este (A1, Cozumel) y costa oeste (A2, Sisal) de la península de Yucatán usando las técnicas ICP-MS, XRF e IEC. El análisis vía ICP-MS se dividió en dos partes, como se señaló anteriormente. En un primer protocolo se obtuvo la concentración de aluminio (Al), hierro (Fe) y titanio (Ti), elementos mayores que además son utilizados como elementos huella de polvo mineral. En el segundo protocolo de ICP-MS se obtuvieron concentraciones de algunos elementos menores y traza. Por otro lado, con la técnica de XRF se encontraron de manera conjunta concentraciones de dos elementos mayores en el polvo mineral, aluminio (Al) y silicio (Si), y algunos elementos menores. Finalmente, con la técnica de IEC se cuantificaron algunos iones solubles importantes.

En las **Figuras 28** y **29** se muestran el diagrama de caja y bigotes de las concentraciones de Al, Fe, y Ti, obtenida por ICP-MS para Cozumel y Sisal, respectivamente. Gracias a los diagramas de caja y bigotes se puede observar la

distribución de las concentraciones halladas en las muestras, la concentración mínima y máxima, y los datos atípicos. Se puede ver en ambos casos (**Figuras 28 y 29**) que dentro estos tres elementos huella de polvo mineral, el aluminio se encuentra en mayor concentración. También se puede notar en la **Figura 29** que en Sisal se registró una mayor cantidad de datos atípicos. Las concentraciones encontradas en Cozumel son aproximadamente tres veces mayores que en Sisal.

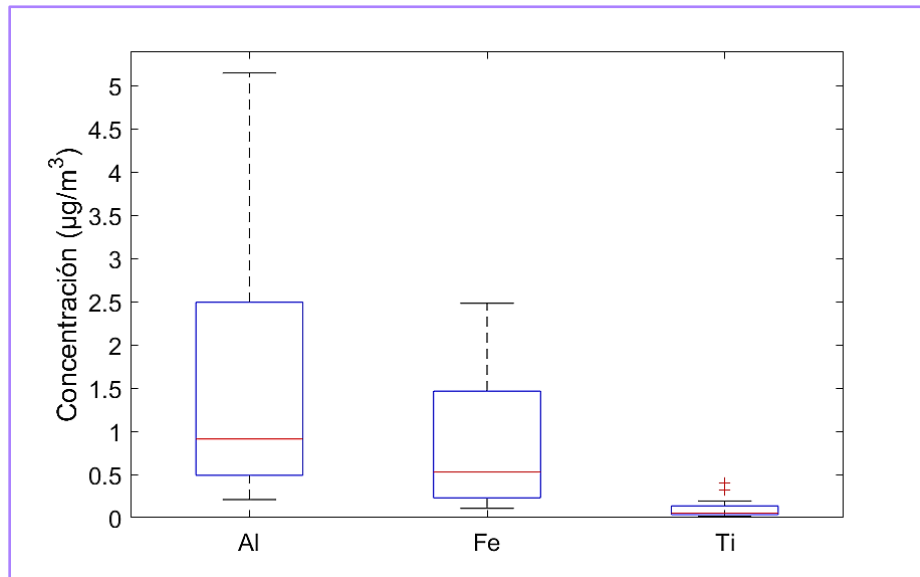


Figura 28. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos huella de polvo mineral en A1 (Cozumel), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

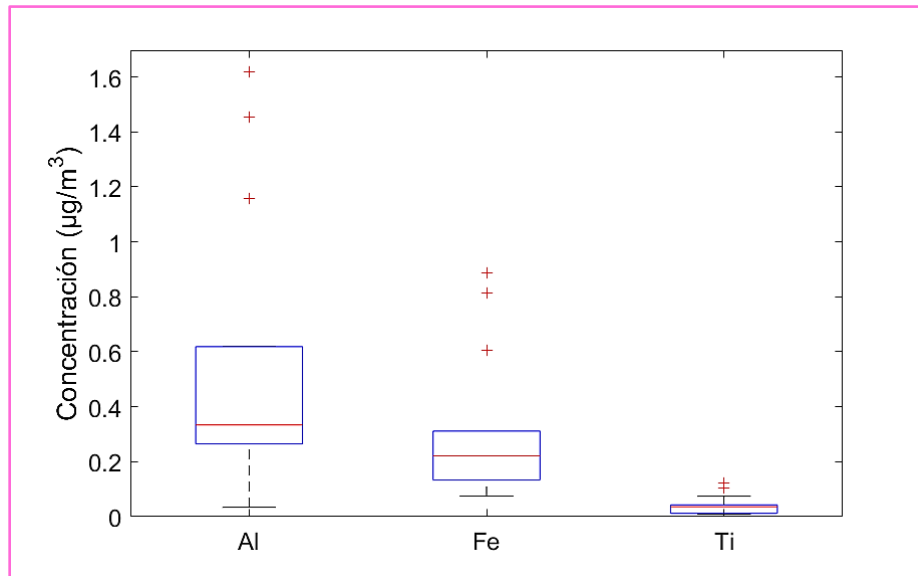


Figura 29. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos huella de polvo mineral en A2 (Sisal), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

En la **Figura 30** se presentan los resultados del segundo protocolo de ICP-MS, para elementos menores y traza, en A1. Los elementos menores más abundantes fueron el Cu y Mn con concentraciones en un rango de 10 a 47 ng/m³ y 3 a 41 ng/m³, respectivamente. También en A1 se observa una mayor dispersión de los datos. En el caso de A2, las concentraciones más altas fueron las de Cu y Mo, como se observa en la **Figura 31**. El Cu con concentraciones de 232 a 414 ng/m³ y el Mo de 24 a 56 ng/m³. Todos los elementos menores y traza analizados por ICP-MS, exceptuando Cu, Mo y Ag, se encuentran en mayor concentración en A1 comparado con A2, siendo los valores de dos a tres veces más grandes. Es interesante notar que el Cu en A2 es incluso 11 veces mayor que en A1. Más adelante se hablará del Cu y de su posible fuente.

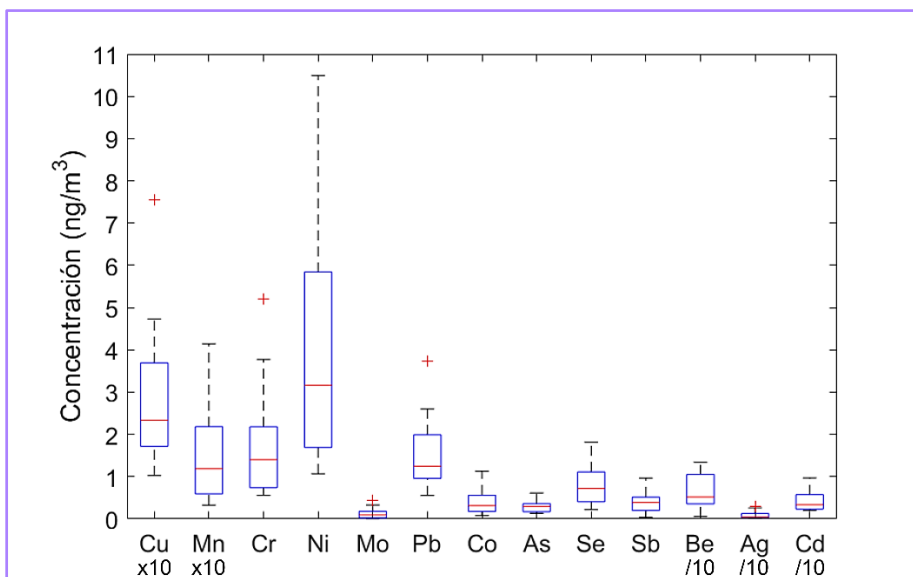


Figura 30. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos traza en A1 (Cozumel), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente *

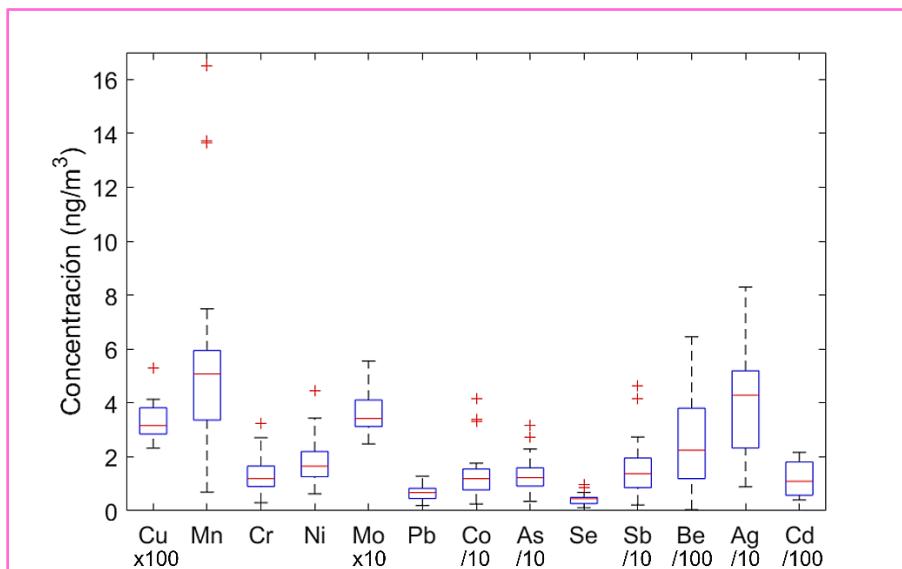
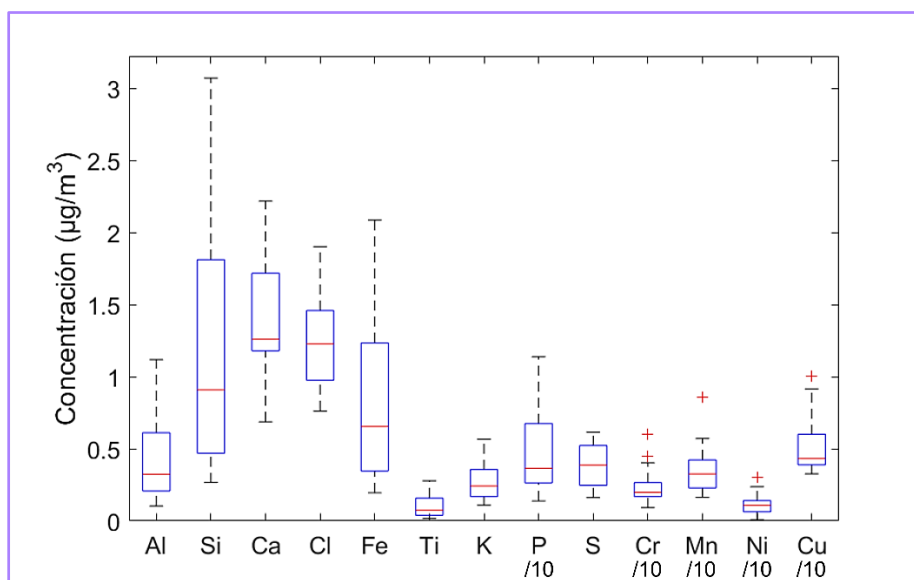


Figura 31. Diagrama de caja y bigotes de concentración de elementos traza en A2 (Sisal), obtenida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente *

*Se realizó un ajuste en la escala para poder observar mejor en el gráfico la distribución de las concentraciones de todos elementos. La leyenda /10 denota que la concentración encontrada del elemento en cuestión debe ser dividida entre 10, /100 denota una división entre 100; x10 denota una multiplicación por 10 y x100 denota una multiplicación por 100

Semejante a lo obtenido mediante ICP-MS, en los resultados de XRF se hallaron altas concentraciones de elementos huella de polvo mineral en ambas costas: Fe, Si y Al. En A1 el elemento con mayor concentración es el Si (**Figura 32**), con valores de 0.3 a 1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido por Ca y Cl, elementos muy relacionados a las emisiones locales (Ladino et al., 2019), dado que la península de Yucatán posee un suelo kárstico y los equipos de muestreo se localizaban cerca de la costa. Finalmente, dentro de los elementos más abundantes en A1 se encuentra el Fe, con concentraciones desde 0.2 a 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En A2 los elementos con mayor concentración son los mismos que en A1 con diferente orden, como se observa en la **Figura 33**: Ca (0.2 – 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl (0.3 – 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Si (0.08– 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe (0.06– 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se encontraron también concentraciones siete veces más grandes de en A2 con respecto a A1. Por otra parte, no se detectó zinc en A1, y en A2 alcanzó concentraciones ente 0.004 a 0.089 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que el resto de los elementos poseen valores mayores en A1, hasta cuatro veces mayor en el caso del hierro. Por último, se observó que existen más datos atípicos en A2.



*Figura 32. Diagrama de caja y bigotes de composición química en A1 (Cozumel), obtenida por fluorescencia de rayos X ***

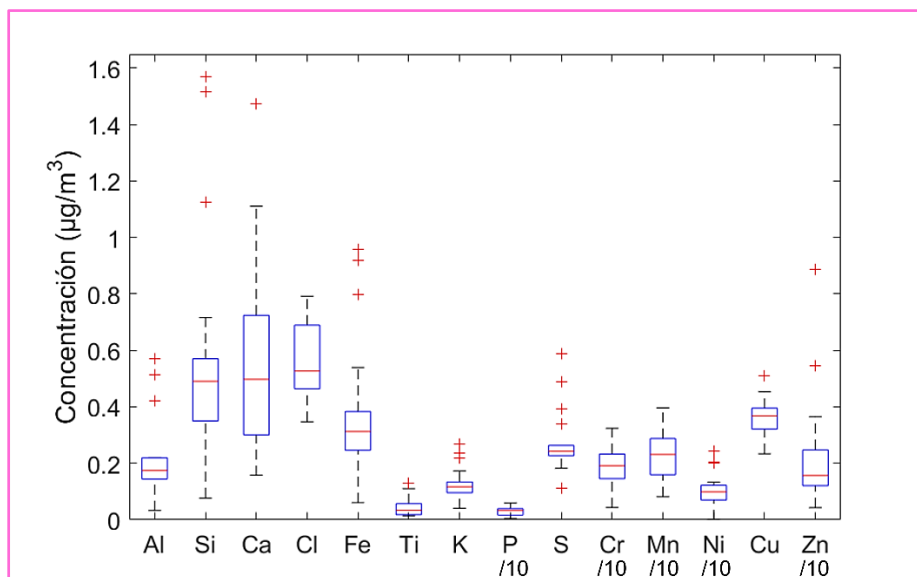


Figura 33. Diagrama de caja y bigotes de composición química en A2 (Sisal), obtenida por fluorescencia de rayos X **

**Se realizó un ajuste en la escala para poder observar mejor en el gráfico la distribución de las concentraciones de todos elementos. La leyenda /10 denota que la concentración encontrada del elemento en cuestión debe ser dividida entre 10.

El último análisis cuantitativo realizado en las muestras de aerosol atmosférico fue el de IEC. El diagrama de caja y bigotes correspondiente a A1 se muestra en la **Figura 34** y el de A2 en la **Figura 35**. En A1 se registraron las más altas concentraciones en Cl⁻ y Na⁺, como se mencionó anteriormente, debido a la cercanía del sitio de muestreo al mar. Tales resultados concuerdan con lo encontrado en XRF, donde el Cl se colocaba dentro de los elementos con mayor concentración en A1 (**Figura 32**). Sin embargo, los valores de concentración obtenidos por ambas técnicas son distintos, esto debido a que en IEC se cuantifica el cloro como ion y en XRF no se hace distinción de la forma en el que se encuentra, además del proceso de extracción realizado en IEC, y la selección del área irradiada en XRF. En ambos sitios de muestreo se encontraron también iones nitrato y sulfato en abundancia, iones relacionados con emisiones antropogénicas.

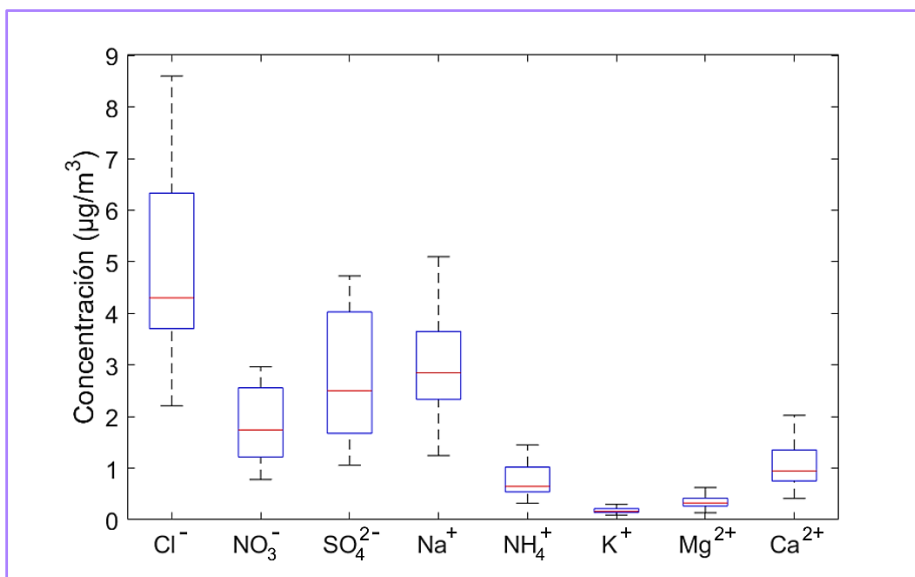


Figura 34. Diagrama de caja y bigotes de iones solubles en A1 (Cozumel), obtenido por cromatografía de intercambio iónico

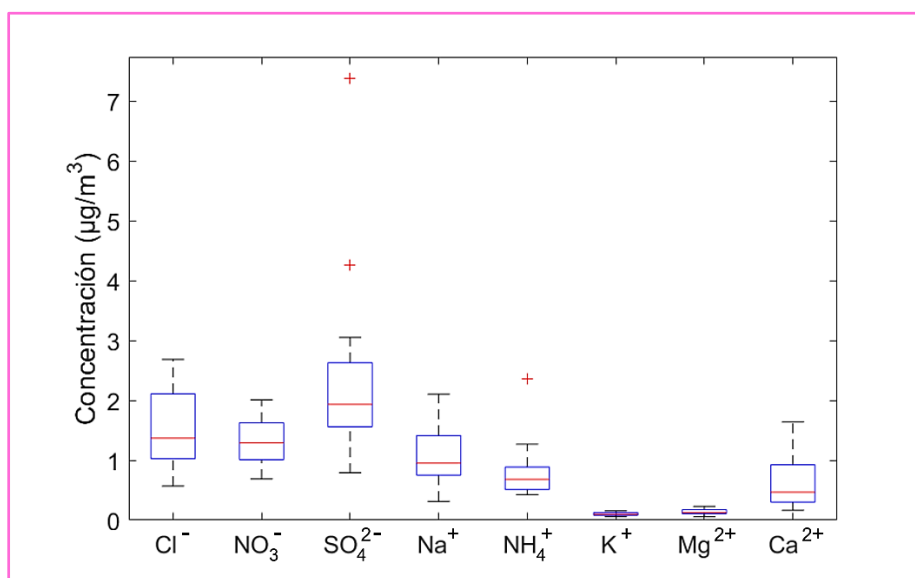


Figura 35. Diagrama de caja y bigotes de iones solubles en A2 (Sisal), obtenido por cromatografía de intercambio iónico

En las tres técnicas analíticas utilizadas (ICP-MS, XRF y IEC) se encontró un patrón repetitivo, donde las concentraciones de la costa este (A1) son generalmente de dos a tres veces mayores que las de la costa oeste (A2). Esto denota un efecto de tipo dilución de las masas de aire entrantes a su paso por la península de Yucatán.

3.4. Comparación entre las muestras con posibles intrusiones de polvo del Sahara y de fondo

La siguiente sección se divide en tres apartados, el primero detallará la correlación entre las concentraciones de las especies analizadas por diferentes técnicas y la concentración másica de PM_{10} . Posteriormente, se introducirá una comparación entre las concentraciones de las muestras relacionadas con las intrusiones de polvo del Sahara y las de fondo, mediante una relación que en adelante denominaremos PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) y, finalmente, se describirán los resultados cualitativos obtenidos mediante XRD, del conjunto de muestras con y sin intrusiones de polvo africano.

Correlación entre composición química y PM_{10}

De forma similar al cálculo de la correlación entre la concentración de PM_{10} y las variables meteorológicas, se evaluó el coeficiente de Spearman entre las series de tiempo de PM_{10} y la concentración de cada elemento y ion soluble analizado. Para ello se utilizaron los promedios de 24 horas de concentración másica de PM_{10} y se tomaron en cuenta las muestras necesarias para completar 24 horas de muestreo. En los casos donde las muestras fueron recolectadas cada 12 horas se sumaron, y en el caso de ser recolectadas por 48 horas el valor se dividió a la mitad para cada día. A continuación, en la **Figura 36** se presentan los coeficientes de Spearman obtenidos.

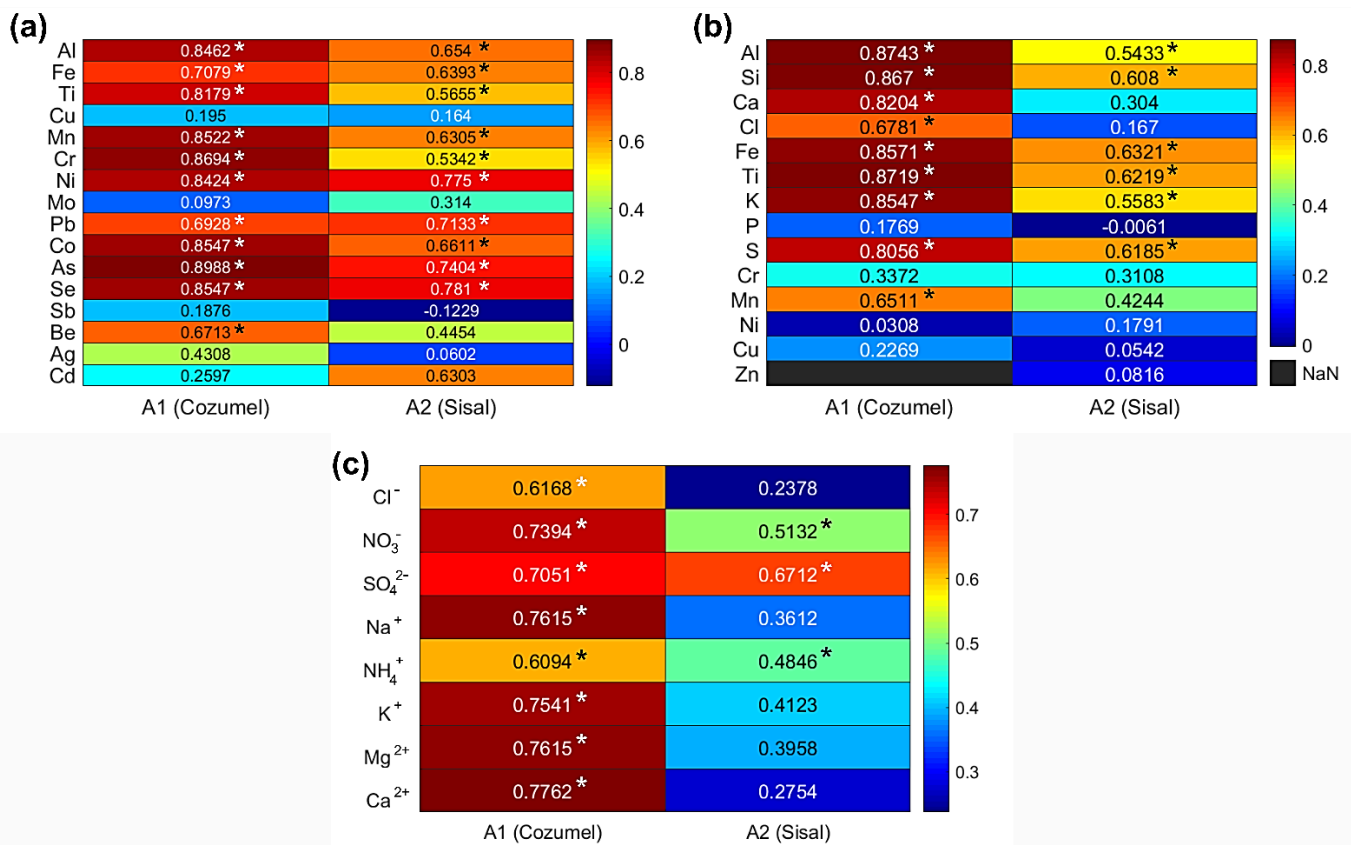


Figura 36. Coeficientes de correlación de Spearman entre las series de tiempo de concentración másica de PM_{10} y las especies químicas analizadas por (a) ICP-MS, (b) XRF y (c) IEC.

* Valores estadísticamente significativos ($p < 0.05$)

En una primera instancia, se puede observar que de todos los coeficientes de Spearman obtenidos solamente Sb y P en A2 presentan valores negativos (**Figura 36**). Al, Fe, Ti, Mn, Cr, Ni, Pb, As, Se y Co exhibieron las correlaciones más fuertes, y estadísticamente significativas, para las concentraciones elementales obtenidas por ICP-MS (**Figura 36a**). Por otro lado, en la **Figura 36b** (resultados por XRF), los coeficientes más altos y significativos fueron Al, Si, Fe, Ti, K y S. Finalmente, a través del análisis de iones solubles se encontraron a NO_3^- , SO_4^{2-} y NH_4^+ , con las correlaciones más altas y estadísticamente significativas en ambas costas (**Figura 36c**). Es importante destacar que los elementos huella de polvo mineral (Al, Si, Fe y Ti) se encuentran dentro de las correlaciones más fuertes ya mencionadas.

Al comparar ambas costas (A1 y A2), se puede notar que los coeficientes de correlación tienden a ser mayores en Cozumel (A1). Mediante este cálculo no se

puede inferir el efecto ligado directamente a las intrusiones de polvo del Sahara, solamente sobre la relación entre la serie de tiempo de PM_{10} y de las especies químicas. De tal manera que la correlación positiva, y con un valor cercano a uno, indica que los picos de concentración másica coinciden en su mayoría con un incremento en la concentración de las especies analizadas. Por ello, en el siguiente apartado se discriminará entre la concentración de fondo y las intrusiones de polvo del Sahara en la península de Yucatán.

Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo)

Para poder evaluar de manera más clara la diferencia entre la contribución local y la relacionada a las intrusiones se utilizó una relación de las concentraciones elementales e iónicas de las muestras asociadas a las intrusiones de polvo del Sahara sobre la concentración de las muestras de fondo (PS/F). De este modo, una relación de $PS/F = 1$ significa que no se existe un cambio perceptible entre la concentración de fondo con respecto a los días con intrusiones de polvo del Sahara. Una relación $PS/F > 1$ indica que la concentración de la especie involucrada es mayor cuando existe algún evento de polvo africano, por lo que podría ser considerada un marcador. Finalmente, una relación $PS/F < 1$ señala que la concentración de fondo predomina, por lo que es probable que la especie analizada provenga mayoritariamente de fuentes locales.

Mediante la técnica de ICP-MS se puede percibir que casi todos los elementos presentan valores de PS/F mayores a dos, es decir que aumentan significativamente su concentración durante los episodios de intrusión de polvo del Sahara. Los elementos Al, Fe, Ti, Mn y Co poseen los PS/F más altos en A1 y A2 (**Figuras 37 y 38**). La relación entre los tres primeros varía entre 8 y 10; mientras que para el Mn y el Co los valores son superiores a 5.5. Asimismo, se observa que, en ambas costas, el Cu muy probablemente proviene de fuentes locales ya que presenta valores muy cercanos a uno; así como el Mo y el Ag en la costa oeste. En la **Figura 39** se observa una tendencia clara en la relación de las concentraciones obtenidas por XRF, donde los elementos huella de polvo mineral (Al, Si, Fe y Ti) exhiben PS/F valores entre 4 y 8.5, que destacan a simple vista del resto de los

elementos analizados. De igual manera, se puede notar que el Cu no está relacionado a las intrusiones de polvo del Sahara, así como Cl, P, Cr, Ni y Zn en el caso de A2. Es posible encontrar cobre en el polvo del Shara en concentraciones muy bajas, por lo que no suele reportarse como un indicativo de la presencia de polvo mineral en una muestra (p. ej., Formenti et al., 2003). Las altas concentraciones de cobre y otros elementos traza (Cd, Pb, Sn, Sb, Zn, Sc, Mo y Ni) sugieren una influencia antropogénica (Scheuvens et al., 2013). Por otra parte, dentro de las fuentes naturales de partículas de aerosol se ha encontrado que el cobre se encuentra enriquecido en las partículas de aerosol marino (Chester & Murphy, 1986). El mecanismo de formación de aerosol marino más importantes es el “bubble-bursting”, que consiste en el estallido de burbujas producidas por el atrapamiento de aire dentro del océano debido a el rompimiento de las olas. Durante este proceso se libera parte de la microcapa superficial del océano a la atmósfera, la capa más superficial que se encuentra enriquecida en metales traza, compuestos orgánicos y material biológico (Chester & Murphy, 1986; Wilson et al., 2015). Dada la cercanía de los sitios de muestro de partículas de aerosol al mar puede aumentar la concentración de cobre localmente.

Finalmente, todos los iones solubles analizados por IEC presentan valores de PS/F mayores a 1.5 (**Figura 40**), lo que indica que posiblemente están relacionados con las intrusiones de polvo africano, recordando que las partículas de polvo del Sahara se han mezclado con diferentes fuentes de aerosol durante su transporte hasta la península de Yucatán.

Existe una diferencia aparente entre las relaciones PS/F de A1 y A2, donde la mayoría de los valores de A1 son mayores que los de A2 (**Figuras 37, 38, 39 y 40**). Sin embargo, esta diferencia podría no ser significativa, dado que se utilizaron pocos datos para calcular la concentración promedio de las muestras relacionadas a las intrusiones de polvo del Sahara y las muestras de fondo. Además, los datos se encuentran muy dispersos, lo que aumenta la incertidumbre asociada a cada promedio y consecuentemente la incertidumbre asociada al valor de PS/F. No obstante, los resultados obtenidos en este estudio sugieren que es posible rastrear de una manera más eficiente la presencia de polvo del Sahara en A1 (Cozumel).

Dado que A1 representa el punto de entrada de las masas de aire provenientes del Sahara, se refuerza la premisa del efecto de dilución, es decir, que a medida que la masa de aire cargada de partículas de polvo del Sahara atraviesa la península de Yucatán va perdiendo intensidad. Lo anterior se ve reflejado en un menor aumento de la concentración másica de PM_{10} en la costa oeste, una menor correlación entre la serie de tiempo de PM_{10} y las especies químicas, y una diferencia menos marcada entre la concentración de fondo y la observada durante las intrusiones del polvo del Sahara.

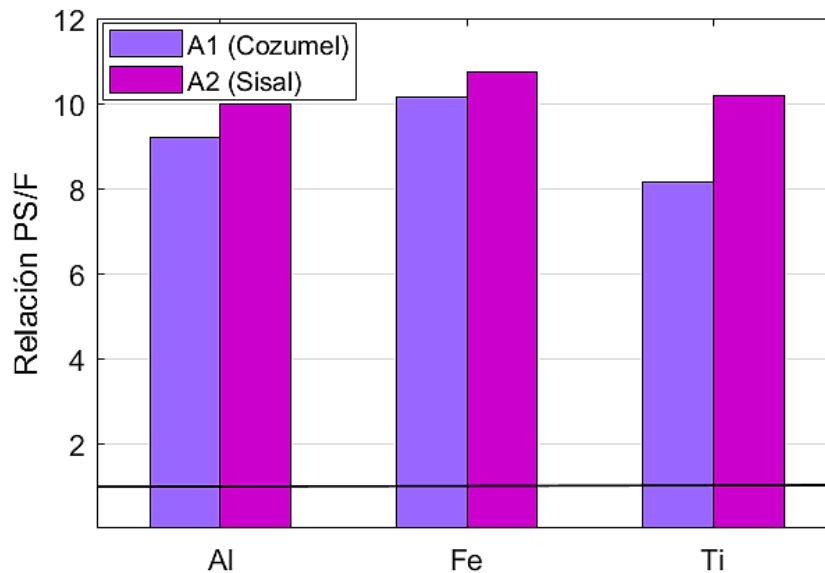


Figura 37. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los elementos huella de polvo mineral analizados por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)

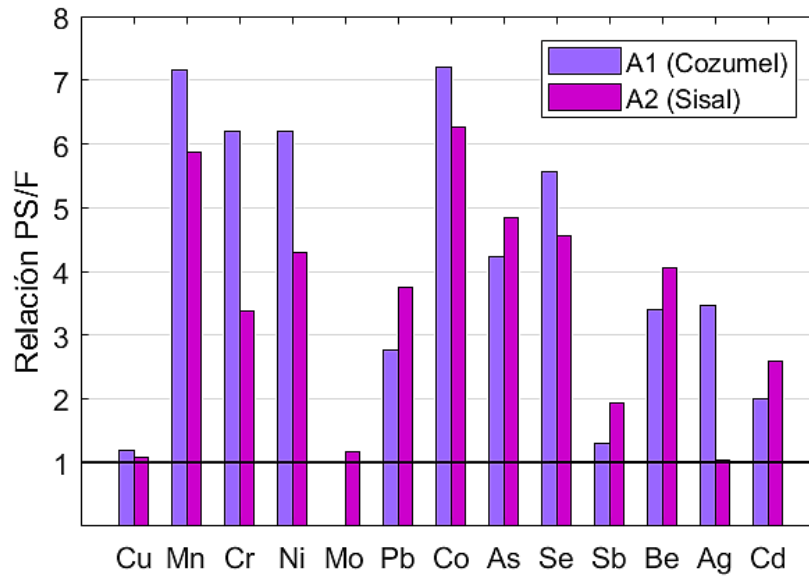


Figura 38. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los elementos menores y traza analizados por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)

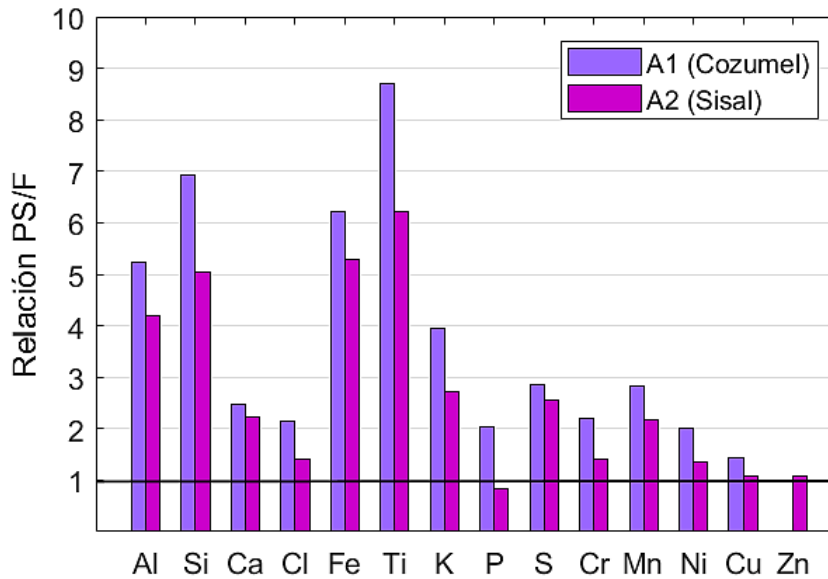


Figura 39. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los elementos analizados por fluorescencia de rayos X en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)

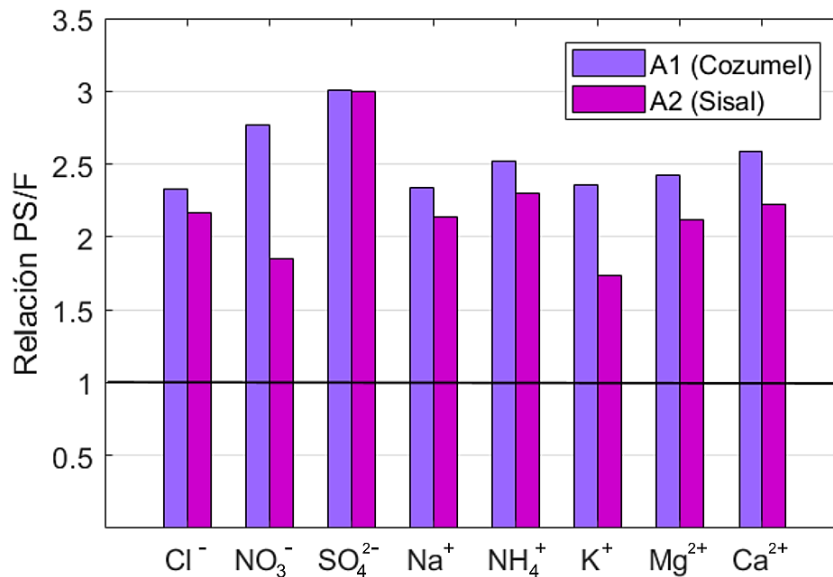


Figura 40. Relación PS/F (Polvo del Sahara/Fondo) para los iones solubles analizados por cromatografía de intercambio iónico en A1 (Cozumel) y A2 (Sisal)

Difracción de rayos X (XRD)

Los resultados de XRD para las muestras de aerosol atmosférico fueron únicamente cualitativos. Para poder analizar las muestras de aerosol recolectadas en los filtros de celulosa se diseñó un protocolo de extracción, descrito en la **sección 2.3.3**. No obstante la cantidad extraída de material particulado no fue la suficiente para distinguir adecuadamente las señales en el difractómetro.

Aunque los resultados no son concluyentes se puede destacar que el protocolo de extracción con el disolvente polar (metanol) fue más eficiente. En los difractogramas (**Anexo 1**) correspondientes a esa extracción se encontraron señales correspondientes a halita (NaCl) y calcita (CaCO₃) en las muestras de fondo. Adicional a estos dos minerales se hallaron señales débiles de silicatos en las muestras asociadas a los eventos de polvo del Sahara.

3.5. Composición química y mineralógica del suelo

En esta sección se reportarán los resultados obtenidos del análisis gravimétrico químico y mineralógico de las tres muestras de suelo recolectadas, donde la primera recolecta se realizó en la costa este (S1, Cozumel), y la segunda y tercera en la costa oeste (S2, El Palmar y S3, Hunucmá). Se presentan los resultados del

porcentaje en peso de elementos huella de polvo mineral analizados mediante la técnica de ICP-MS, siguiendo el protocolo de digestión ácida fuerte (**Figura 41**). Por otro lado, en la **Figura 42** se muestran los porcentajes en peso de los elementos analizados vía XRF y en la **Figura 43** la composición mineralógica porcentual obtenida por XRD.

En el análisis por ICP-MS se observa que Al tiene el mayor porcentaje de los elementos huella de polvo mineral analizados. Estos tres elementos representan menos del 14% del peso de la muestra, además, S2 tiene valores mayores comparado con S1. En la **Figura 41** no se colocaron los resultados de la muestra S3 debido a que presentó valores por debajo del límite de detección.

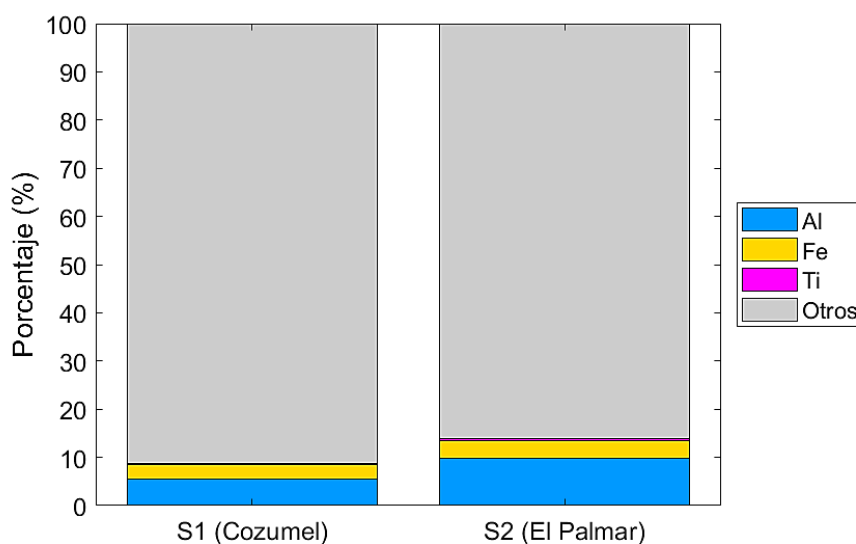


Figura 41. Concentración porcentual de elementos huella de polvo mineral de las muestras de suelo de S1 (Cozumel) y S2 (El Palmar) analizadas por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

Por otra parte, el análisis de XRF ofrece un panorama más completo de la composición química de las muestras de suelo. En el gráfico de barras (**Figura 42**) se puede ver la alta variabilidad entre las muestras. A pesar de que S2 y S3 pertenezcan a la costa oeste, poseen una composición diferente debido al uso de suelo donde fue tomada cada muestra, el primer sitio perteneciente a una reserva ecológica y el segundo sitio destinado a actividades agrícolas. La fracción inorgánica representa alrededor del 31% al 44% del peso total. Se puede notar

también que existe una ligera diferencia entre los resultados obtenidos por ICP-MS y XRF, dado que en este caso S2 presenta un menor porcentaje de Al. Si es el elemento más abundante, seguido por Al, Fe, Ca, K y Ti.

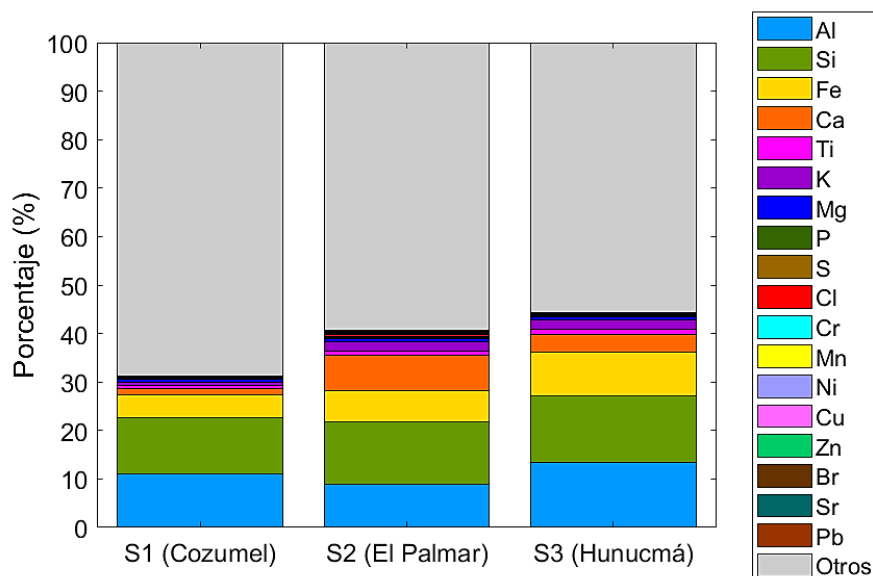


Figura 42. Composición elemental porcentual de las muestras de suelo de S1 (Cozumel), S2 (El Palmar) y S3 (Hunucmá), analizadas por fluorescencia de rayos X

Por último, el análisis mineralógico reveló que los minerales mayoritarios son cuarzo (SiO_2), illita ($((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$), calcita (CaCO_3) y caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (Figura 43). Además de estos minerales, en S1 se encontró esmectita, magnetita y ferrhidrita; en S2 feldespato potásico y en S3 hematita y boehmita.

En diversas muestras de polvo tomadas en el Sahara se encontró que entre los minerales dominantes se encuentra el cuarzo, los feldespatos (plagioclasa y feldespato potásico), los carbonatos (calcita, dolomita) los sulfatos (yeso y anhidrita), los cloruros (halita), las micas (moscovita y biotita) e hidróxidos (goetita) (Scheuven et al., 2013). Sin embargo, las partículas que preferencialmente ascienden del suelo a la atmósfera, y que luego pueden ser transportadas largas distancias, poseen radios aerodinámicos de $10 \mu\text{m}$. Por lo que las partículas de polvo del Sahara que han sido transportadas se encuentran enriquecidas en minerales arcillosos respecto al cuarzo, al feldespato y a los carbonatos. Un dato importante, es que durante este transporte, se considera que la proporción de los

minerales arcilla illita y caolinita, permanecen constantes (Caquineau et al., 1998; Scheuvens et al., 2013).

El suelo de la península de Yucatán se caracteriza por estar dominado por las rocas calizas, sin embargo, en los horizontes se puede encontrar una combinación de otras fuentes minerales debido al transporte eólico, como residuos volcánicos, sedimentos de otras costas, y el polvo del Sahara (Cabadas et al., 2010; Estrada et al., 2019). Cabadas et al. (2010) realizó un estudio mineralógico del suelo rojo en tres puntos de la península de Yucatán, encontró que hasta los 135 cm de profundidad predomina el cuarzo, con aproximadamente 50% de la fracción arenosa; mientras que en la fracción arcillosa predomina la caolinita seguido por la vermiculita y la goetita. Por debajo de los 135 cm se encuentra la caliza.

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que existe un fuerte aporte del polvo del Sahara que es depositado anualmente durante las intrusiones en la península de Yucatán, dado que el análisis por XRD mostró una mayor afinidad entre la composición mineralógica de los suelos muestreados y la reportada para el polvo del Sahara. Además, es interesante mencionar que S2 (El Palmar) es una reserva natural, por lo que es posible detectar mejor los procesos que sufre el suelo, dado que la intervención antropogénica es limitada. Sin embargo, las muestras de suelo analizadas no son representativas, pues son muestras superficiales (de 5 a 10 cm de profundidad) y que se obtuvieron a través de un muestreo simple, en colaboración con otros equipos de trabajo, por lo que los sitios de muestreo no se encontraban en la misma zona que los puntos de muestreo de partículas de aerosol. De los tres puntos de muestreo, en la costa este (S1, Cozumel) no se detectó calcita, uno de los minerales mayoritarios del suelo de la península de Yucatán. Lo cual puede deberse también a un error en la metodología aplicada. Para poder distinguir mejor la contribución de los materiales parentales del transporte a larga distancia es importante realizar toma de muestras de suelo más profundas y representativas.

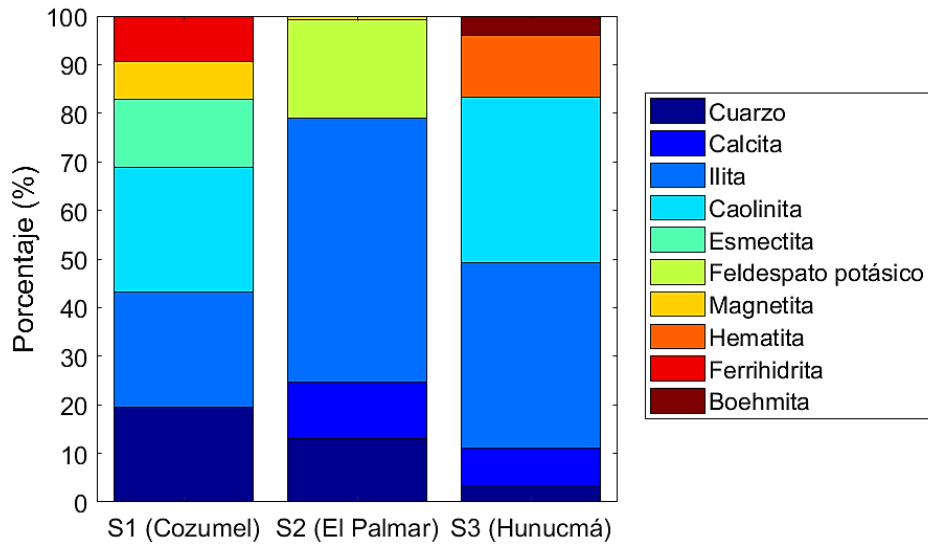


Figura 43. Composición mineralógica porcentual de las muestras de suelo de S1 (Cozumel), S2 (El Palmar) y S3 (Hunucmá), analizadas por difracción de rayos X

3.6. Re-suspensión de suelo

Ya que la naturaleza de las muestras de aerosol atmosférico y suelo es diferente, para poder discriminar entre una posible re-suspensión de suelo y las intrusiones de polvo del Sahara, se calcularon las proporciones elementales $(\text{Elemento}/\text{Al})_{\text{muestra}}$, de esta manera se podrán observar las tendencias en la composición elemental propias de cada tipo de muestra. Para el cálculo de la proporción elemental se utilizó el promedio de las concentraciones obtenidas por XRF de las muestras ya seleccionadas como fondo y aquellas relacionadas con intrusiones de polvo del Sahara, así como la concentración de las muestras de suelo. Se eligieron los resultados de XRF debido a que no requirieron tratamiento previo de muestras, lo cual unifica la metodología y ofrece concentraciones de una mayor cantidad de elementos. Además, se seleccionó al aluminio como elemento de referencia debido a que es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre.

Las tendencias de las muestras correspondientes a la costa este (Cozumel) se muestran en la **Figura 44** y las de la costa oeste (Sisal) en el **Figura 45**. Se puede ver que tanto en la costa este como en la costa oeste cada tipo de muestra posee un patrón de proporción elemental diferente. Además, al realizar una comparación

visual del mismo tipo de muestra en ambas costas se puede notar que los patrones correspondientes a las muestras de polvo del Sahara y de fondo de cada costa comparten similitudes entre ellos. Lo anterior refleja el parecido en la naturaleza de las muestras de aerosol atmosférico, es decir, que provienen de una fuente de origen similar.

Como se mencionó anteriormente, el silicio es uno de los elementos dominantes en el polvo del Sahara. Las proporciones de Si/Al obtenidas en el presente estudio fueron de 3 (costa este) y 2.8 (costa oeste) para las muestras asociadas con intrusiones de polvo del Sahara, mientras que las proporciones de Si/Al de las muestras de fondo y suelo van de 1 a 2.3. En un análisis comparativo Scheuvs et al. (2012) encontró que la proporción elemental de Si/Al de muestras de polvo y sedimentos recolectados en diferentes puntos al norte de África varía entre 2.5 y 7. De tal manera que las proporciones de Si/Al de las muestras de partículas de aerosol con influencia de intrusiones de polvo del Sahara concuerdan con lo reportado por Scheuvs et al. (2012). Por otra parte, Scheuvs et al. (2012) encontró proporciones de Fe/Al mayoritariamente entre 0.4 y 0.8. En este caso, las proporciones elementales de Fe/Al de las muestras de aerosol no coinciden con los resultados reportados, pues se obtuvieron valores mayores a 1.

Se puede ver en las **Figuras 44 y 45** que las proporciones que muestran la mayor diferencia entre las tres muestras es Ca/Al y Cl/Al. Donde las muestras de fondo tienen los mayores valores, seguido por las muestras con polvo del Sahara y finalmente las muestras de suelo. De acuerdo con Formenti et al. (2003), las muestras de polvo tomadas a bordo de un avión dentro de la SAL, sobre la región de Cabo Verde, poseen una proporción de Ca/Al de 0.36 y una proporción de Cl/Al de 0.056 en la fracción gruesa (PM₁₀). El aumento pronunciado en las proporciones de Ca y Cl respecto al en las muestras de fondo puede relacionarse con las fuentes locales de la península de Yucatán, debido al ambiente kárstico y las emisiones marinas. En tanto que las muestras relacionadas con las intrusiones de polvo del Sahara se encuentran enriquecidas en Al, y han experimentado una interacción con

diferentes tipos de aerosol a lo largo de su transporte, incluyendo también las emisiones propias de la península, lo que disminuye el valor de Ca/Al y Cl/Al.

En conclusión, se puede suponer que el polvo mineral identificado con las técnicas analíticas en las muestras de aerosol, si proviene del transporte a larga distancia desde el continente africano y no de una re-suspensión de suelo de la península de Yucatán. Las relaciones de Si/Al, Ca/Al y Cl/Al representan una herramienta útil para discriminar entre los diferentes orígenes de las muestras de partículas de aerosol. Para una mejor diferenciación entre las contribuciones de las fuentes locales y las del transporte de polvo del Sahara se requiere aumentar el número de muestras, así como la toma de muestras representativas de suelo.

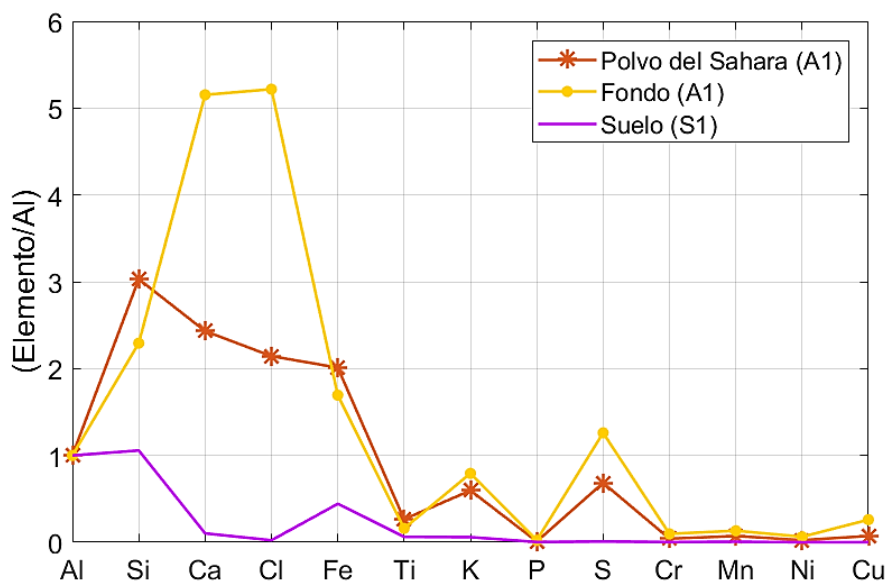


Figura 44. Relaciones de concentración Elemento/Al obtenidas mediante la técnica XRF, para las muestras de aerosol relacionadas con intrusiones de polvo del Sahara, muestras de aerosol de fondo y la muestra de suelo de la costa este de la península de Yucatán

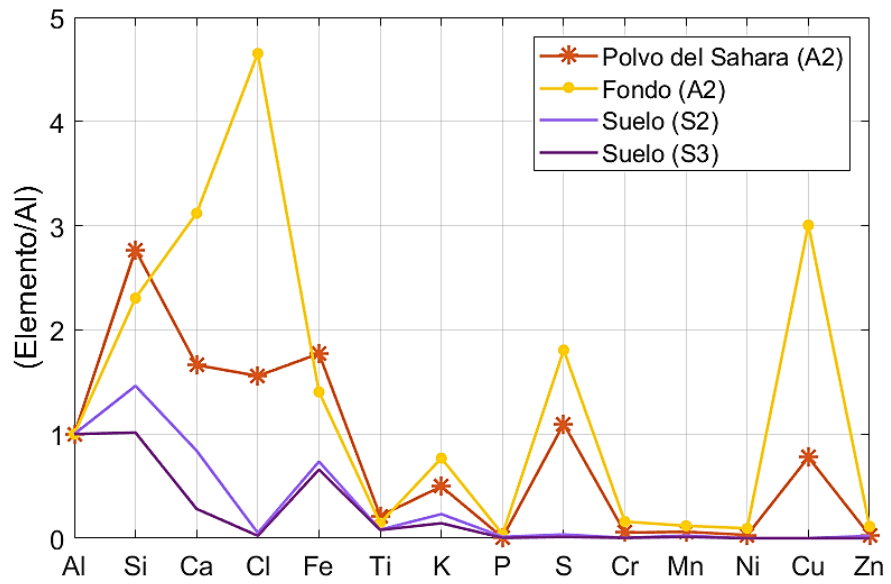


Figura 45. Relaciones de concentración Elemento/Al obtenidas mediante la técnica XRF, para las muestras de aerosol relacionadas con intrusiones de polvo del Sahara, muestras de aerosol de fondo y la muestra de suelo de la costa oeste de la península de Yucatán

4. Conclusiones

- En este estudio se logró identificar satisfactoriamente el transporte de polvo mineral en la península de Yucatán proveniente del desierto del Sahara a través de datos meteorológicos, análisis de composición química y mineralógica, y monitoreo satelital. Se identificaron tres intrusiones de polvo del Sahara entre el 4 y el 24 de julio de 2021.
- Las intrusiones de polvo del Sahara estudiadas fueron menos intensas comparado con otros años, con una concentración máxima de PM_{10} de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual es mucho menor a las registradas en el 2018 ($135 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en 2020 ($317 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en Mérida, Yucatán.
- No se encontró correlación entre la serie de tiempo de concentración másica y las series de tiempo de las variables meteorológicas medidas (temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y presión).
- Las imágenes satelitales y las retro-trayectorias de las masas de aire calculadas por medio del modelo HYSPLIT confirman el transporte de plumas de polvo mineral desde el norte del continente africano hasta la península de Yucatán. Además, el perfil vertical de humedad relativa de los días donde se detectaron intrusiones de polvo del Sahara coincide con el patrón reportado en otros estudios de una masa de aire perteneciente al Saharian Air Layer (SAL).
- Se encontró que las concentraciones obtenidas a través de las diferentes técnicas analíticas son de dos a tres veces mayores en la costa este (A1, Cozumel).
- El cálculo de la correlación entre las especies químicas analizadas con la serie de tiempo de PM_{10} , y el cálculo de la relación PS/F ayudan a detectar el polvo del Sahara a través de los cambios en la composición química, siendo más eficiente este método en la costa este, el punto de entrada de las masas de aire africanas.
- Las altas concentraciones de cobre en las muestras de partículas de aerosol provienen de fuentes locales y no están relacionadas con las intrusiones de polvo del Sahara.

- Se halló un efecto de dilución de las masas de aire cargadas de partículas de polvo africano donde pierde intensidad conforme atraviesa la península de Yucatán.
- En el análisis mineralógico se logró identificar cualitativamente señales pertenecientes a halita (NaCl) y calcita (CaCO₃) en las muestras de fondo y señales débiles adicionales de silicatos en las muestras asociadas a intrusiones de polvo del Sahara.
- Existe una alta variabilidad en la composición química y mineralógica en los suelos muestreados en la península de Yucatán. Estos suelos poseen una contribución de polvo mineral en su composición mineralógica, debido al depósito anual de polvo del Sahara en el territorio mexicano.
- Las proporciones elementales de Si/Al, Ca/Al y Cl/Al, sugieren que las partículas de aerosol recolectadas en A1 y A2 no comparten similitud con las muestras de suelo. Por lo que tanto se puede suponer que la re-suspensión de suelo no posee una contribución importante en la composición química en las partículas de aerosol muestreadas durante el periodo de llegada de polvo del Sahara.

5. Recomendaciones y perspectivas a futuro

- Se recomienda continuar con el monitoreo anual del transporte de polvo del Sahara para construir una base de datos para realizar una comparación interanual y asegurar el análisis de posibles eventos masivos de intrusiones de polvo del Sahara, como lo ocurrido en el 2020.
- Para la realización de los análisis vía XRD se sugiere realizar muestreos de aerosol atmosférico por más horas o utilizar una mayor cantidad de filtro para poder extraer una mayor cantidad de material particulado y cuantificar la composición mineralógica.
- Se recomienda realizar la toma de muestras de suelo en los diferentes horizontes y que sean representativas, para poder estimar adecuadamente el efecto del depósito del polvo del Sahara en la formación del suelo de la península de Yucatán.
- A la par de los análisis de composición química y mineralógica más completa se podrían incluir análisis de los núcleos de glaciación (INPs) ya que se sabe que el polvo mineral se encuentra dentro de los INPs más importantes a nivel global. Así se podría continuar estimando efecto del polvo del Sahara en el ciclo hidrológico de la región y relacionarlo a su composición química y mineralógica.
- Dado que el polvo mineral puede ser un acarreador de partículas biológicas, es importante realizar también estudios para identificar y aislar los microorganismos presentes en muestras de aerosol atmosférico relacionadas con intrusiones de polvo del Sahara en la península.

6. Socialización de resultados en Congresos

Ma. de L. Montserrat Silva, Daniel Rosas, Bernardo Figueroa, Javier Morales, Jorge Uuh, Marco Pinto, Harry Álvarez, Teresa Pi Puig, Graciela B. Raga, Dara Salcedo, Irma Rosas, Jessica Olivares y Luis A. Ladino. *Caracterización química del polvo mineral proveniente del Desierto del Sahara en la Península de Yucatán*. Reunión Anual 2021 de la Unión Geofísica Mexicana (RAUGM 2021). Presentación en modalidad oral, llevada a cabo en Guadalajara, Jalisco, México del 31 de octubre al 5 de noviembre de 2021.

Ma. de L. Montserrat Silva, Daniel Rosas, Teresa Pi Puig, Salett Novelo, Javier Miranda, Harry Álvarez, Bernardo Figueroa, Javier Morales, Jorge Uuh, Marco Pinto, Graciela B. Raga, Dara Salcedo, Irma Rosas, Jessica Olivares y Luis A. Ladino. *Chemical characterization of African dust particles in the Yucatan Peninsula*. 11th International Aerosol Conference (IAC 2022). Presentación en formato cartel, llevada a cabo en Atenas, Grecia del 4 al 9 de septiembre de 2022.

Ma. de L. Montserrat Silva, Daniel Rosas, Harry Álvarez, Teresa Pi Puig, Salett Novelo, Jessica Olivares, Bernardo Figueroa, Javier Morales, Jorge Uuh, Marco Pinto, Dara Salcedo, Irma Rosas, Graciela B. Raga y Luis A. Ladino. *Caracterización química del polvo mineral proveniente del Desierto del Sahara en la Península de Yucatán*. 1^{er} Congreso Estudiantil del Instituto de Ciencias Atmosféricas y Cambio Climático (ICAYCC). Presentación en modalidad oral, llevada a cabo en Ciudad de México, México del 12 al 14 de octubre de 2022.

7. Referencias

- Adams, A., Prospero, J. M., & Zhang, C. (2012). CALIPSO-Derived three-dimensional structure of aerosol over the atlantic basin and adjacent continents. *Journal of Climate*, 25(19), 6862–6879. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00672.1>
- Adams, F. (2005). *X X-RAY ABSORPTION AND DIFFRACTION* (P. Worsfold, A. Townshend, & C. Poole (eds.); Second Edi). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00668-3>
- Amundson, R. (2003). Soil Formation. *Treatise on Geochemistry*, 5–9, 1–35. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05073-8>
- Ayuntamiento de Cozumel. (2021). *Nuestro municipio*. <https://cozumel.gob.mx/nuestro-municipio/>
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., & Aguilar, Y. (2015). Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán México: enfoque geomorfo-pedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(6), 303–315.
- Bloss, W. (2019). Measurement of air pollutants. In *Encyclopedia of Environmental Health* (Second Edi, Vol. 4, Issue October 2018). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11354-5>
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, C., Bretherton, C., Feingold, G., Foster, P., Kerminen, V. M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P. J., Satheesh, S. K., Sherwood, S., Stevens, B., & Zhang, X. Y. (2013). Clouds and Aerosols. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 571–657). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>
- Buseck, P. R., & Schwartz, S. E. (2013). Tropospheric Aerosols. In *The Atmosphere* (Vol. 5). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)60210-7](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)60210-7)
- Byju's Learning. (2021). *Soil Profile*. <https://byjus.com/biology/soil-profile/>
- Cabadas, H. V., Solleiro, E., Sedov, S., Pi, T., & Alcalá, J. R. (2010). The Complex Genesis of Red Soils in Peninsula de Yucatán, Mexico: Mineralogical, Micromorphological and Geochemical Proxies. *Eurasian Soil Science*, 43(13), 1439–1457. <https://doi.org/10.1134/S1064229310130041>
- Caquineau, S., Gaudichet, A., Gomes, L., Magonthier, M. C., & Chatenet, B. (1998). Saharan dust: Clay ratio as a relevant tracer to assess the origin of soil-derived aerosols. *Geophysical Research Letters*, 25(7), 983–986. <https://doi.org/10.1029/98GL00569>
- Carlson, T. N., & Prospero, J. M. (1972). The Large-Scale Movement of Saharan Air Outbreaks over the Northern Equatorial Atlantic. *Journal of Applied Meteorology*, 11, 283–297. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011<0283:TLSMOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011<0283:TLSMOS>2.0.CO;2)

- Carrillo, N. (2011). *Atlas de Riesgos del Municipio de Cozumel*, Municipio de Cozumel, Estado de Quintana Roo, 1-159.
- Chester, R., & Murphy, K. J. T. (1986). Oceanic Sources of Copper to the Atlantic Aerosol. *The Science of the Total Environment*, *49*, 325–338.
- Chung, C. E., Ramanathan, V., & Decremmer, D. (2012). Observationally constrained estimates of carbonaceous aerosol radiative forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(29), 11624–11629. <https://doi.org/10.1073/pnas.1203707109>
- Claquin, T., Schulz, M., & Balkanski, Y. J. (1999). Modeling the mineralogy of atmospheric dust sources. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *104*(D18), 22243–22256. <https://doi.org/10.1029/1999JD900416>
- Colbeck, I. (2008). *Environmental Chemistry of Aerosols*. Blackwell Publishing Ltd.
- 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., Garcíá, 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>
- D’Almeida, G. A. (1986). A Model for Saharan Dust Transport. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *25*(7), 903–916. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2)
- Doula, M. K., & Sarris, A. (2016). Soil Environment. In *Environment and Development*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62733-9.00004-6>
- Dunion, J. P. (2011). Rewriting the climatology of the tropical North atlantic and Caribbean Sea atmosphere. *Journal of Climate*, *24*(3), 893–908. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3496.1>
- Dunion, J. P., & Velden, C. S. (2004). The impact of the Saharan Air Layer on Atlantic tropical cyclone activity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *85*(3), 353–365. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-353>
- Engelbrecht, J. P., Moosmüller, H., Pincock, S., Jayanty, R. K. M., Lersch, T., & Casuccio, G. (2016). Technical note: Mineralogical, chemical, morphological, and optical interrelationships of mineral dust re-suspensions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *16*(17), 10809–10830. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10809-2016>
- Espinosa, A. A., Reyes-Herrera, J., Miranda, J., Mercado, F., Veytia, M. A., Cuautle, M., & Cruz, J. I. (2012). Development of an X-ray fluorescence spectrometer for environmental science applications. *Instrumentation Science and Technology*, *40*(6), 603–617. <https://doi.org/10.1080/10739149.2012.693560>
- Estrada, H., Jiménez, J. J., Álvarez, O., & Barrientos, R. C. (2019). El karst de

- Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria*, 29, e2292. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2292>
- Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, J. N. (1999). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-257060-5.X5000-X>
- Formenti, P., Elbert, W., Maenhaut, W., Haywood, J., & Andreae, M. O. (2003). Chemical composition of mineral dust aerosol during the Saharan Dust Experiment (SHADE) airborne campaign in the Cape Verde region, September 2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(18). <https://doi.org/10.1029/2002jd002648>
- Friedlander, S. K. (2000). *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics* (2nd Edition). Oxford University Press.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Torres, O., & Chin, M. (2004). Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation. *Environmental Modelling and Software*, 19(2), 113–128. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00114-2)
- Guadarrama, P., Salinas-Peba, L., Chiappa-Carrara, X., & Ramos-Zapata, J. A. (2018). Florística, composición y estructura de las comunidades vegetales de la porción occidental de la Reserva Estatal Ciénegas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.1746>
- Gunn, R., & Phillips, B. B. (1957). AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR POLLUTION ON THE INITIATION OF RAIN. *Journal of Atmospheric Sciences*, 14(3), 257–280. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1957\)014<0272:AEIOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0272:AEIOTE>2.0.CO;2)
- Haddad, P. R. (2001). Ion chromatography retrospective. *Analytical Chemistry*, 73(9), 266A-273A. <https://doi.org/10.1021/ac012440u>
- Hara, K., & Zhang, D. (2012). Bacterial abundance and viability in long-range transported dust. *Atmospheric Environment*, 47, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.050>
- Hillel, D. (2008). Soil Formation. In D. Hillel (Ed.), *Soil in the Environment*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-348536-6.50008-3>
- Hyder, M., & Jönsson, J. Å. (2015). Aerosols , Sampling and Sample Treatment Methods : A Review and State of the Art. *Air Pollution and Pollutants, February 2014*, 295–316.
- INAFED. (2021) *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM23quintanaroo/municipios/23008a.html>, [/enciclopedia/EMM31yucatan/municipios/31038a.html](http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM31yucatan/municipios/31038a.html), [/enciclopedia/EMM31yucatan/municipios/31102a.html](http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM31yucatan/municipios/31102a.html)
- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/#Tabulados>

- Jennings, J. N. (1971). *Karst: An Introduction to Systematic Geomorphology*. MIT Press.
- Kalev, S. D., & Toor, G. S. (2018). The Composition of Soils and Sediments. *Green Chemistry: An Inclusive Approach*, 339–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00014-5>
- Kandler, K., Schütz, L., Deutscher, C., Ebert, M., Hofmann, H., Jäckel, S., Jaenicke, R., Knippertz, P., Lieke, K., Massling, A., Petzold, A., Schladitz, A., Weinzierl, B., Wiedensohler, A., Zorn, S., & Weinbruch, S. (2009). Size distribution, mass concentration, chemical and mineralogical composition and derived optical parameters of the boundary layer aerosol at Tinfou, Morocco, during SAMUM 2006. *Tellus*, 61B, 31–50. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v61i1.16798>
- 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>
- Ladino, L. A., & Abbatt, J. P. D. (2013). Laboratory investigation of Martian water ice cloud formation using dust aerosol simulants. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(1), 14–25. <https://doi.org/10.1029/2012JE004238>
- Ladino, L., Raga, G., Alvarez-Ospina, H., Andino-Enríquez, M., Rosas, I., Martínez, L., Salinas, E., Miranda, J., Ramírez-Díaz, Z., Figueroa, B., Chou, C., Bertram, A., Quintana, E., Maldonado, L., Si, M., & Irish, V. (2019). Ice-nucleating particles in a coastal tropical site. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9), 6147–6165. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6147-2019>
- Levin, Z., & Cotton, W. R. (2009). *Aerosol Pollution Impact on Precipitation*. Springer.
- Liu, Z., Omar, A., Vaughan, M., Hair, J., Kittaka, C., Hu, Y., Powell, K., Trepte, C., Winker, D., Hostetler, C., Ferrare, R., & Pierce, R. (2008). CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: A case study of long-range transport. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(7), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2007JD008878>
- Lohmann, U., Lüönd, F., & Mahrt, F. (2016). *An Introduction to Clouds: From Microscale to Climate*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139087513>
- Marple, V. A., Rubow, K. L., & Behm, S. M. (1991). A microorifice uniform deposit impactor (moudi): Description, calibration, and use. *Aerosol Science and Technology*, 14(4), 434–436. <https://doi.org/10.1080/02786829108959504>
- Mülmenstädt, J., Sourdeval, O., Delanoë, J., & Quaas, J. (2015). Frequency of occurrence of rain from liquid-, mixed-, and ice-phase clouds derived from A-Train satellite retrievals. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6502–6509. <https://doi.org/10.1002/2015GL064604>
- Myhre, G., Samset, B. H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Berntsen, T. K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T., Easter, R. C., Feichter, J., Ghan, S. J., Hauglustaine, D., Iversen, T., Kinne, S., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Lin, G.,

- ... Zhou, C. (2013). Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4), 1853–1877. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1853-2013>
- NCEI. (2022). *Global Forecast System (GFS)*. <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast#:~:text=GFS%20is%20a%20global%20model,one%20week%20and%20two%20weeks>
- Ng, N. L., Herndon, S. C., Trimborn, A., Canagaratna, M. R., Croteau, P. L., Onasch, T. B., Sueper, D., Worsnop, D. R., Zhang, Q., Sun, Y. L., & Jayne, J. T. (2011). An Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) for routine monitoring of the composition and mass concentrations of ambient aerosol. *Aerosol Science and Technology*, 45(7), 780–794. <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.560211>
- Prospero, J. M. (1999). Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D13), 15917–15927. <https://doi.org/10.1029/1999JD900072>
- Prospero, J. M., & Carlson, T. N. (1972). Vertical and Areal Distribution of Saharan Dust over the Western During the Barbados Oceanographic air below . In this paper , we present by first extracting. *Journal of Geophysical Reseach*, 77(27), 5255–5265.
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (1997). *Microphysics of Clouds and Precipitation* (2nd Editio). Kluwer Academic.
- Raga, G. B., Ladino, L. A., Baumgardner, D., Ramirez-Romero, C., Córdoba, F., Alvarez-Ospina, H., Rosas, D., Amador, T., Miranda, J., Rosas, I., Jaramillo, A., Yakobi-Hancock, J., Kim, J. S., Martínez, L., Salinas, E., & Figueroa, B. (2021). ADABBOY: African dust and biomass burning over yucatan. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(8), E1543–E1556. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0172.1>
- Ramírez-Romero, C., Jaramillo, A., Córdoba, M. F., Raga, G. B., Miranda, J., Alvarez-Ospina, H., Rosas, D., Amador, T., Kim, J. S., Yakobi-Hancock, J., Baumgardner, D., & Ladino, L. A. (2021). African dust particles over the western Caribbean - Part I: Impact on air quality over the Yucatán Peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(1), 239–253. <https://doi.org/10.5194/acp-21-239-2021>
- Rogers, R. R., & Yau, M. K. (1989). *A short Course in Cloud Physics* (3rd Editio). Elsevier.
- Scheuvens, D., Schütz, L., Kandler, K., Ebert, M., & Weinbruch, S. (2013). Bulk composition of northern African dust and its source sediments - A compilation. *Earth-Science Reviews*, 116(1), 170–194. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.005>
- Secretaría de Desarrollo Sustentable. (2022). *Sistema de Áreas Naturales Protegidas del Estado de Yucatán (SANPY): Reserva Estatal El Palmar*.

https://sds.yucatan.gob.mx/areas-naturales/ficha_el_palmar.php

- SEMAR-DIGAOHM. (2021). *EL SISAL, YUCATÁN*.
<https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioSisal.pdf>
- Shao, Y., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., Mikami, M., Tanaka, T. Y., Wang, X., & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4), 181–204.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>
- Skoog, D. A., West, D. M., & Holler, J. F. (2014). *Fundamentos de Química Analítica*. Cengage Learning.
- Smichowski, P., & Gómez, D. (2015). Spectroscopic and Chromatographic Techniques and Methodologies for the Determination of Metals, Metalloids and Ions in Atmospheric Aerosols. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 70, 239–266. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2015.09.007>
- Stevanović, Z. (2015). Karst Environment and Phenomena. In *Karst Aquifers - Characterization and Engineering* (pp. 19–46). Springer Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_2
- Strelí, C., Wobrauschek, P., & Kregsamer, P. (1999). X-ray Fluorescence Spectroscopy, Applications. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 2478–2487. <https://doi.org/10.1006/rwsp.2000.0337>
- Sun, J., & Ariya, P. A. (2006). Atmospheric organic and bio-aerosols as cloud condensation nuclei (CCN): A review. *Atmospheric Environment*, 40(5), 795–820. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.052>
- Suryanarayana, C., & Norton, M. G. (1998). X-Rays and Diffraction. In *X-Ray Diffraction* (pp. 3–19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0148-4_1
- Tegen, I., & Schepanski, K. (2018). Climate Feedback on Aerosol Emission and Atmospheric Concentrations. *Current Climate Change Reports*, 4, 1–10.
<https://doi.org/10.1007/s40641-018-0086-1>
- Thomas, R. (2008). *Practical Guide to ICP-MS, A Tutorial for Beginners* (Second Edi). <https://doi.org/10.1201/9781420067873>
- Tomasi, C., Fuzzi, S., & Kokhanovsky, A. (2017). *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*. Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA.
<https://doi.org/10.1002/9783527336449>
- TSI. (2021). *DustTrak™ DRX Aerosol Monitor 8533*.
<https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/dust-monitors/dusttrak-drx-aerosol-monitor-8533/>
- Twomey, S. (1977). The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 34(7), 1149–1152.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPO>2.0.CO;2)
- Uuh-Sonda, J. M., Figueroa-Espinoza, B., Gutiérrez-Jurado, H. A., & Méndez-Barroso, L. A. (2022). Ecosystem Productivity and Evapotranspiration Dynamics of a Seasonally Dry Tropical Forest of the Yucatan Peninsula. *Journal*

of *Geophysical Research: Biogeosciences*, 127(1).
<https://doi.org/10.1029/2019JG005629>

- Vázquez, M. M., & May, D. A. (2016). Riqueza específica y biodiversidad de Cozumel, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis. Turismo, Negocios, Recursos Naturales*, 19, 137–171. <https://doi.org/10.22403/UQROOMX/TYP19/07>
- Whittig, L. D., & Allardice, W. R. (2018). X-ray diffraction techniques. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 9(9), 331–362. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c12>
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (Fourth Edi). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6>
- Williams, P., & Fong, Y. T. (2010). *World map of carbonate rock outcrops v3.0*, Auckland University, New Zealand.
- Wilschefski, S. C., & Baxter, M. R. (2019). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *Clinical Biochemist Reviews*, 40(3), 115–133. <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024>
- Wilson, T. W., Ladino, L. A., Alpert, P. A., Breckels, M. N., Brooks, I. M., Browse, J., Burrows, S. M., Carslaw, K. S., Huffman, J. A., Judd, C., Kilthau, W. P., Mason, R. H., McFiggans, G., Miller, L. A., Najera, J. J., Polishchuk, E., Rae, S., Schiller, C. L., Si, M., ... Murray, B. J. (2015). A marine biogenic source of atmospheric ice-nucleating particles. *Nature*, 525(7568), 234–238. <https://doi.org/10.1038/nature14986>
- Yu, H., Chin, M., Yuan, T., Bian, H., Remer, L. A., Prospero, J. M., Omar, A., Winker, D., Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., & Zhao, C. (2015). The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1984–1991. <https://doi.org/10.1002/2015GL063040>

Anexo A

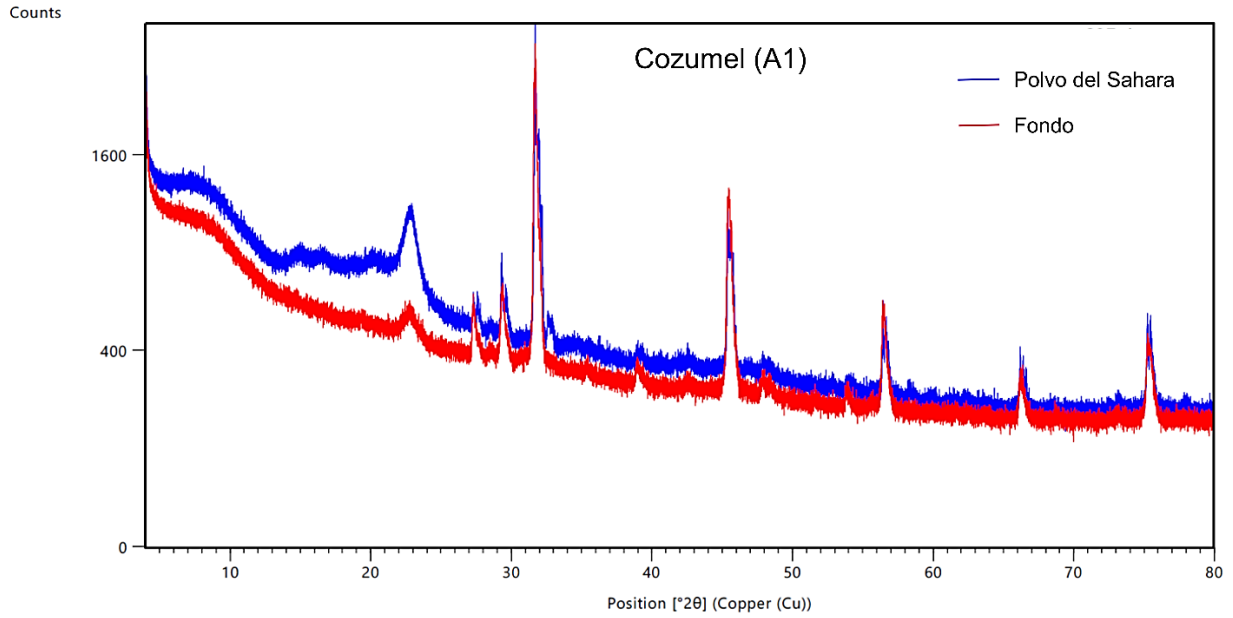


Figura A. Difractograma comparativo de las muestras con polvo del Sahara y de fondo extraídas con metanol para Cozumel (A1).

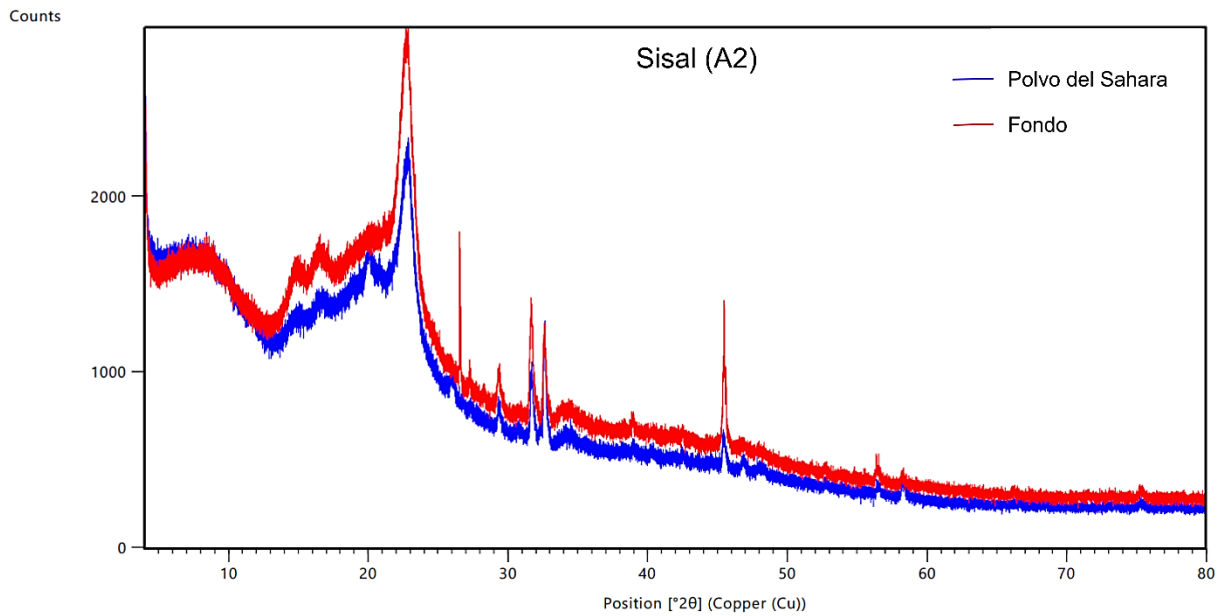


Figura B. Difractograma comparativo de las muestras con polvo del Sahara y de fondo extraídas con metanol para Sisal (A2).

Anexo B

A continuación, se presenta la recopilación de imágenes satelitales de algunos ejemplos de seguimiento de plumas de polvo del Sahara. Las **Figuras C y D** corresponden a plumas dentro del periodo de la primera y segunda intrusión, respectivamente. La **Figura E** muestra la trayectoria de una pluma que no atravesó por el territorio mexicano. Se incluyen también algunos ejemplos de retro-trayectorias calculadas en ambas costas antes y después de cada intrusión de polvo del Sahara (**Figuras F, G y H**). Finalmente, en la **Figura I** se muestran las retro-trayectorias de uno de los días donde se observaron concentraciones de PM_{10} de fondo.

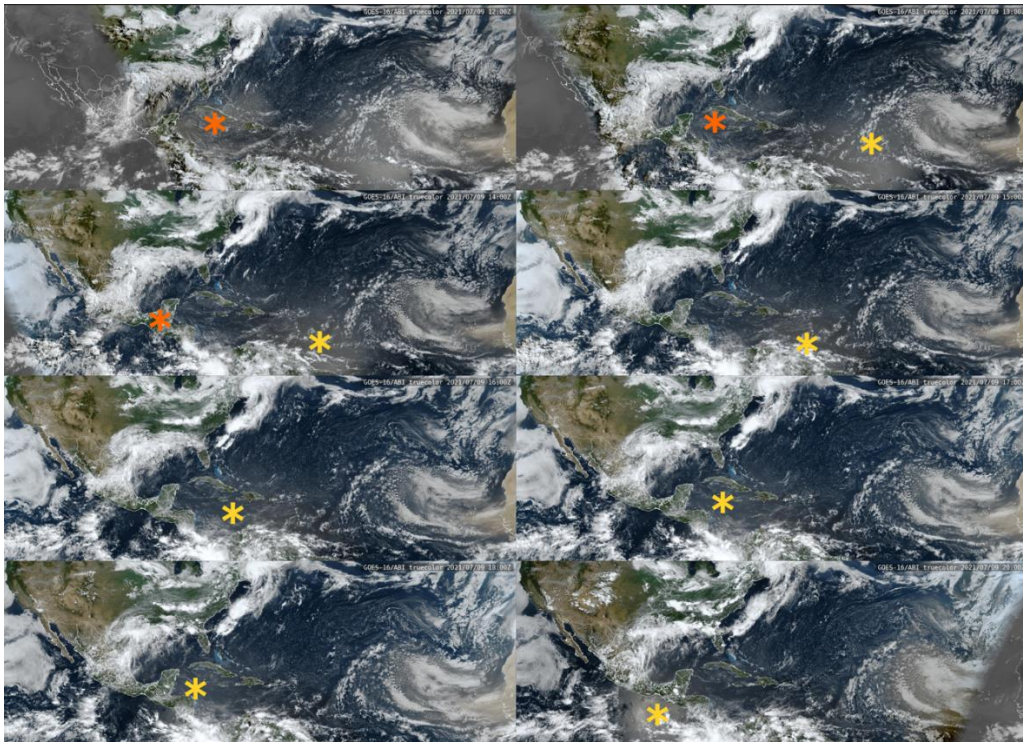


Figura C. Seguimiento por imágenes del satélite GOES-16 a color real de las plumas de polvo del Sahara observadas el 10/07/2021 (LANOT, 2022).

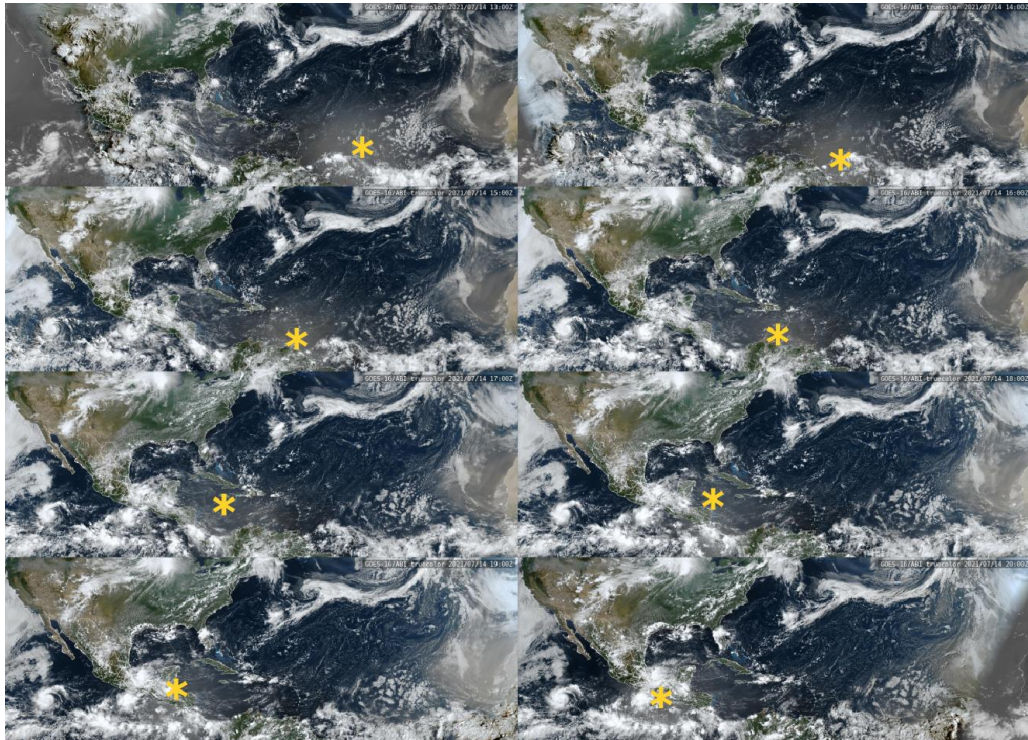


Figura D. Seguimiento por imágenes del satélite GOES-16 a color real de la pluma de polvo del Sahara observada el 14/07/2021 (LANOT, 2022).

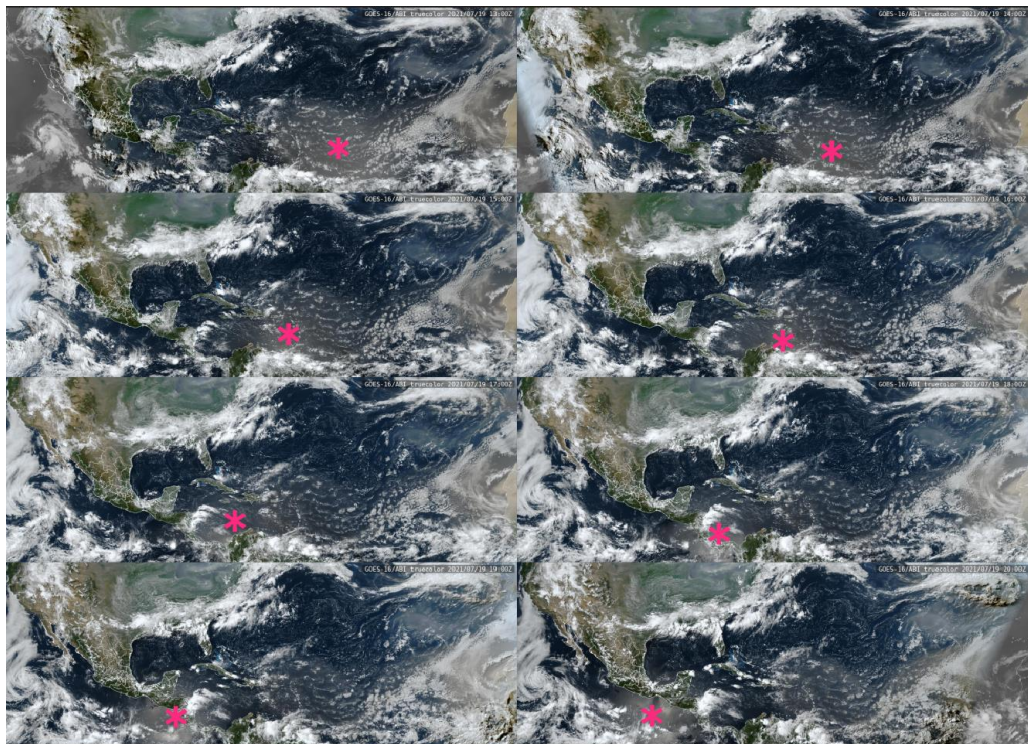


Figura E. Seguimiento por imágenes del satélite GOES-16 a color real de la pluma de polvo del Sahara observada el 19/07/2021 (LANOT, 2022).

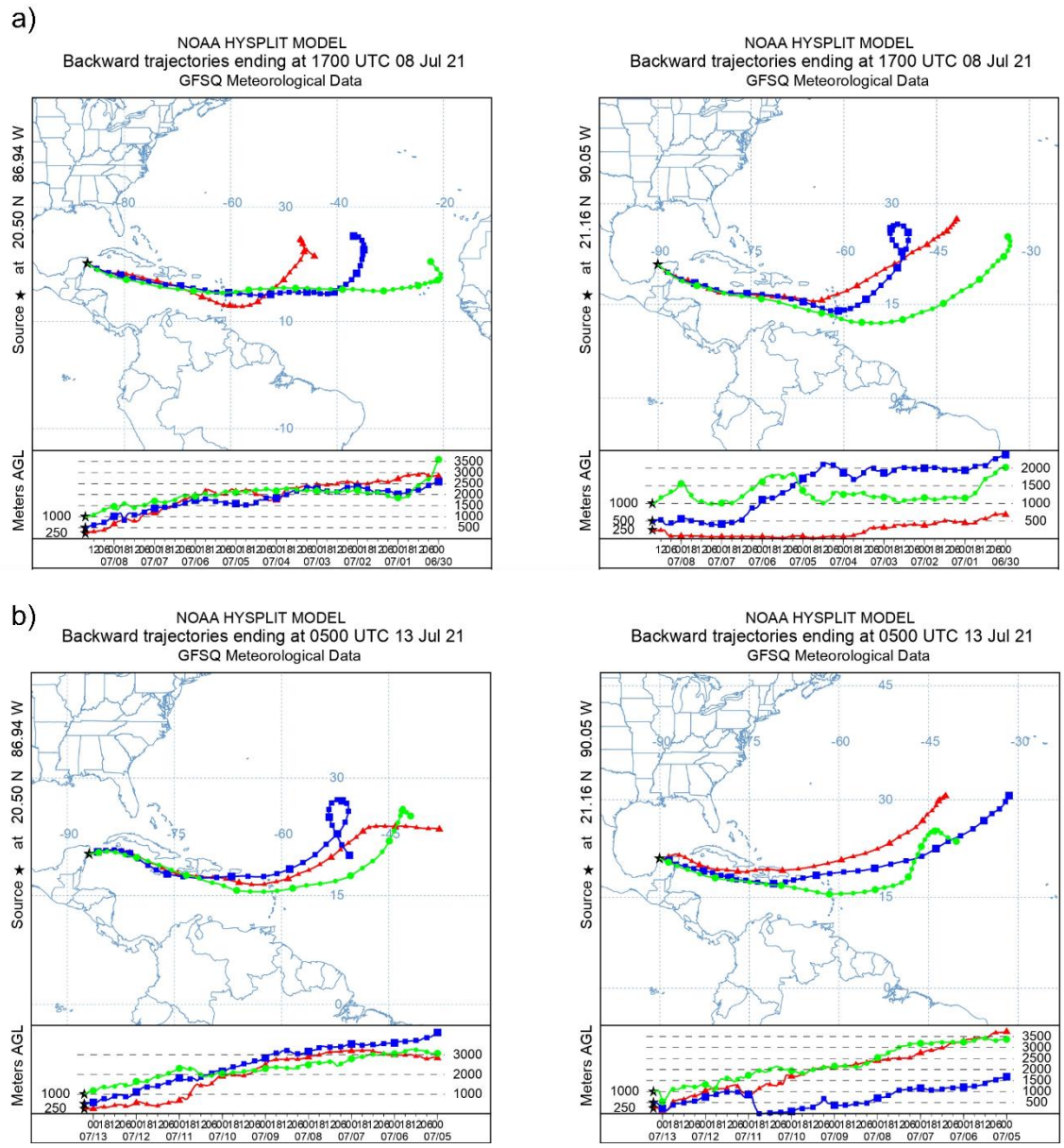


Figura F. Retro-trayectorias calculadas para: (a) 08/07/2021 a las 12:00 p.m. y (b) 13/07/2021 a las 12:00 a.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio. Se corrió el modelo HYSPLIT para 13 días a 250 m (rojo), 500 m (azul) y 1000 m (verde) sobre el nivel del suelo.

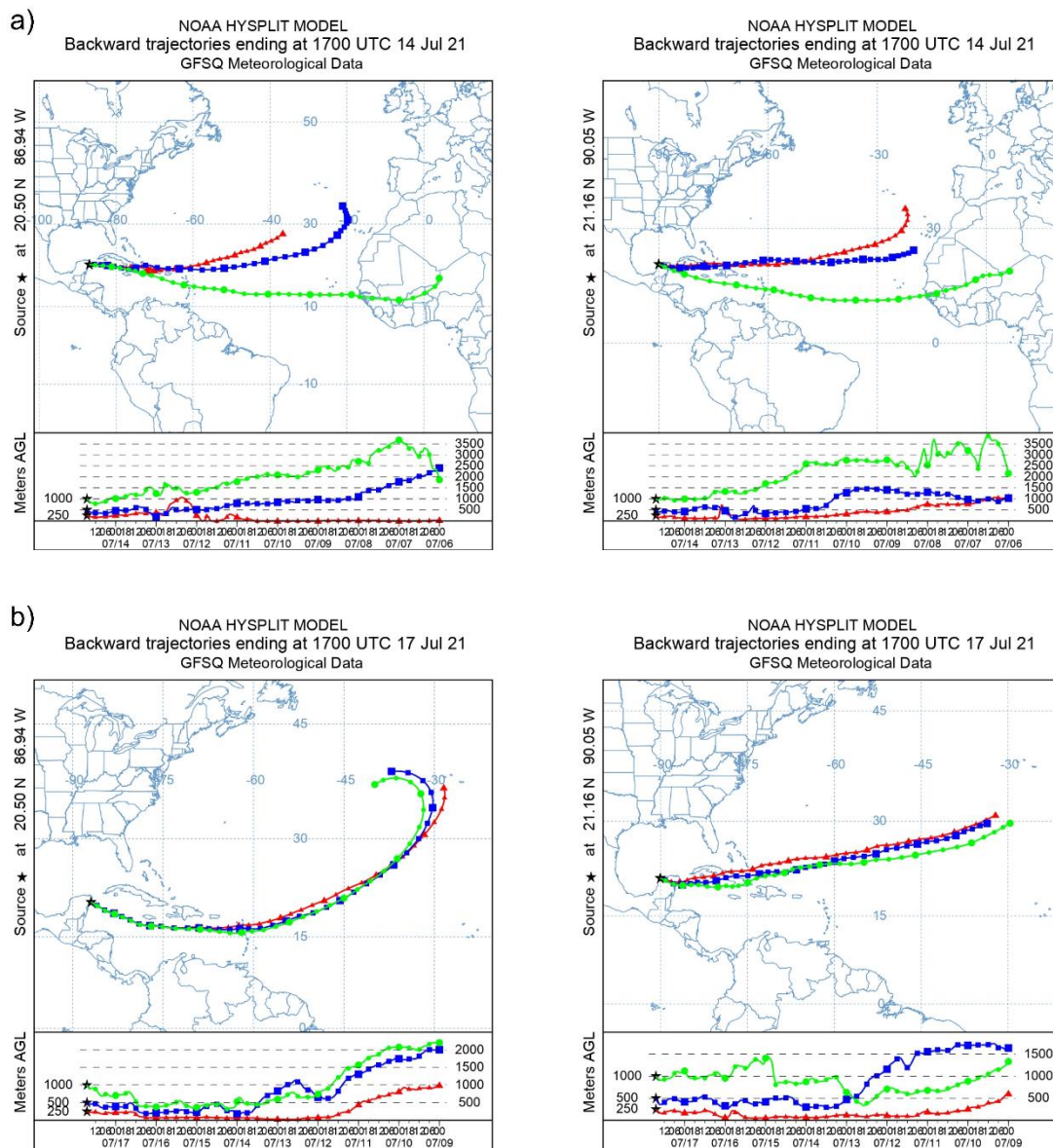


Figura G. Retro-trayectorias calculadas para: (a) 14/07/2021 a las 12:00 p.m. y (b) 17/07/2021 a las 12:00 p.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio. Se corrió el modelo HYSPLIT para 13 días a 250 m (rojo), 500 m (azul) y 1000 m (verde) sobre el nivel del suelo.

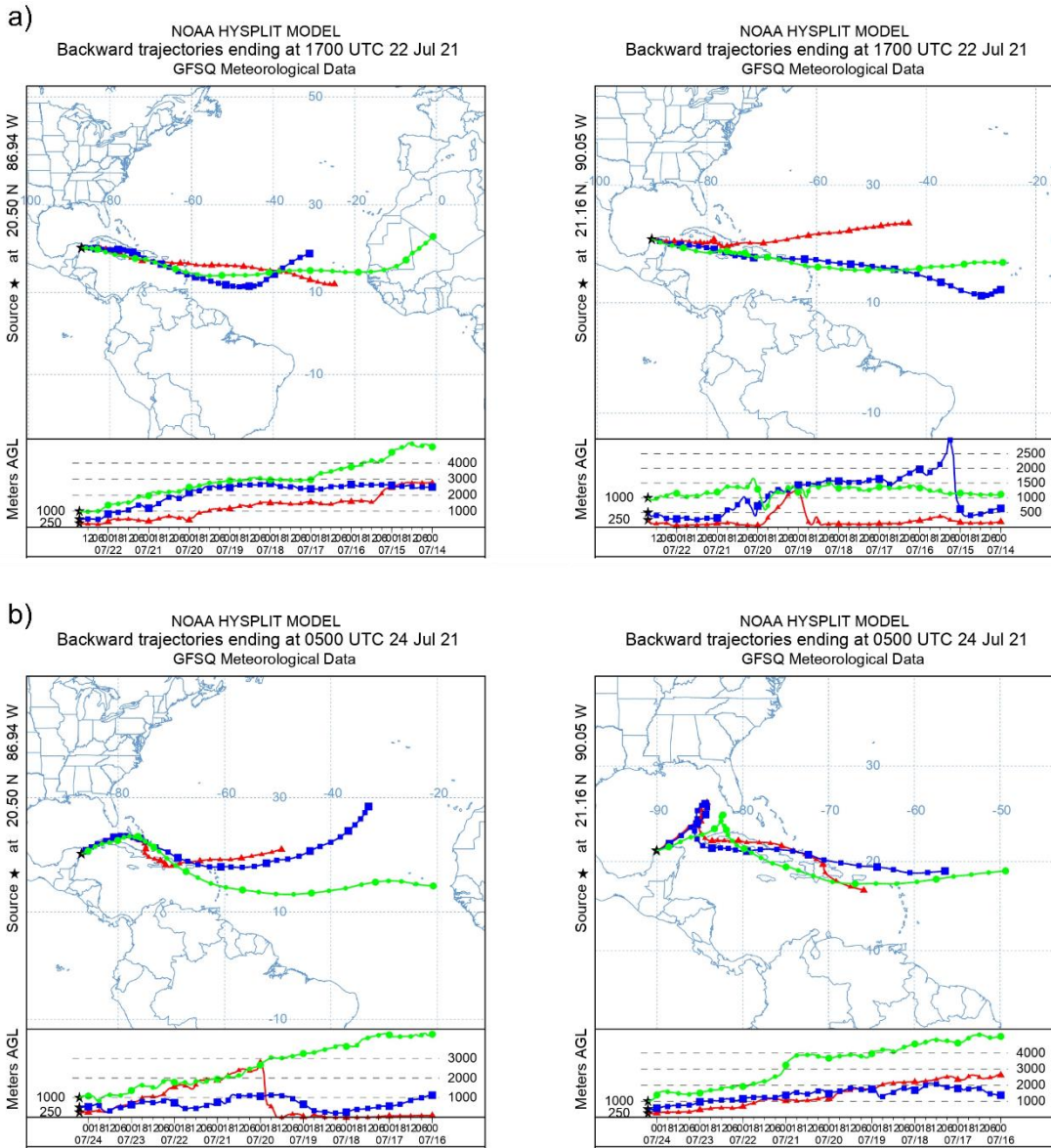


Figura H. Retro-trayectorias calculadas para: (a) 22/07/2021 a las 12:00 p.m. y (b) 24/07/2021 a las 12:00 a.m. El lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio. Se corrió el modelo HYSPLIT para 13 días a 250 m (rojo), 500 m (azul) y 1000 m (verde) sobre el nivel del suelo.

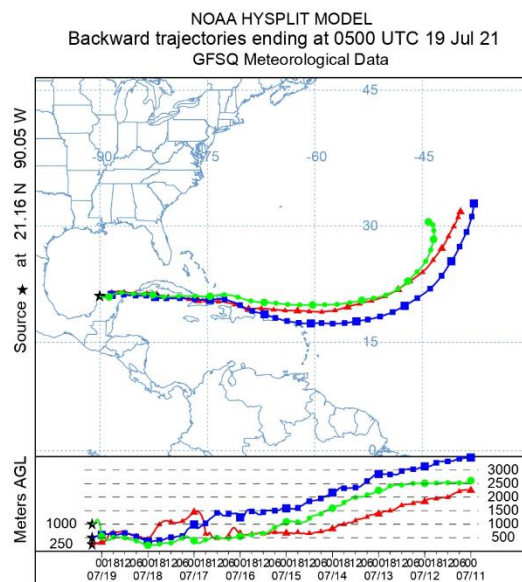
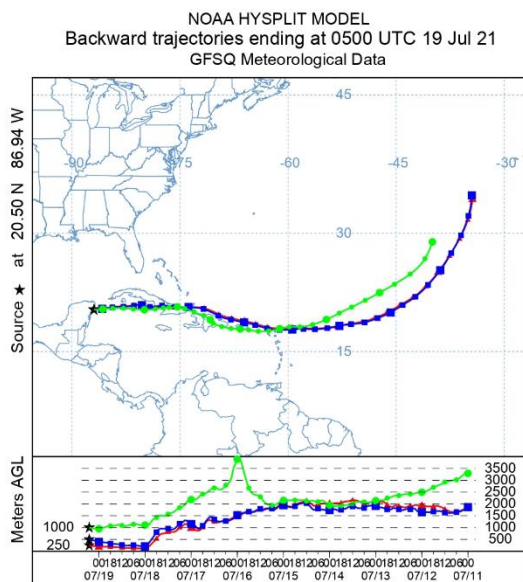


Figura I. Retro-trayectorias calculadas para el 19/07/2021 a las 12:00 a.m., el lado izquierdo de cada inciso corresponde a A1 y el derecho a A2, como punto de inicio. Se corrió el modelo HYSPLIT para 13 días a 250 m (rojo), 500 m (azul) y 1000 m (verde) sobre el nivel del suelo.