



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“Determinación de concentraciones de ^{10}Be en muestras naturales de Ciudad de México mediante Espectrometría de Masas con Aceleradores”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

MALVIS ROBAINA MESA

COMITÉ TUTOR

Dra. Corina Solís Rosales; Dr. Javier Miranda Martín del Campo; Dra. Grisel Méndez García
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

JURADO EXAMINADOR

- 1) Dra. Corina Solís Rosales (Director de Tesis)
 - 2) Dr. Javier Miranda Martín del Campo (Presidente)
 - 3) Dra. Ofelia Morton Bermea (Vocal)
 - 4) Dr. Santiago Padilla Domínguez (Suplente)
 - 5) Dra. Rocío García Martínez (Suplente)
- PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Ciudad de México, Enero 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

ÍNDICE

<u>DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....</u>	<u>1</u>
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	<u>2</u>
<u>DEDICATORIA.....</u>	<u>4</u>
<u>1 RESUMEN</u>	<u>5</u>
<u>2 INTRODUCCIÓN</u>	<u>6</u>
2.1 OBJETIVO	8
2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2.2 HIPÓTESIS.....	9
<u>3 MARCO TEÓRICO</u>	<u>10</u>
3.1 ATMÓSFERA TERRESTRE Y SU COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	10
3.1.1 ESTRUCTURA DE LA ATMÓSFERA.....	12
3.2 LOS RAYOS CÓSMICOS.....	14
3.2.1 RADIOISÓTOPOS COSMOGÉNICOS.....	19
3.3 ¹⁰Be	22

3.4	ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACELERADORES	25
3.5	MEDICIÓN DE ¹⁰BE EN AMS	29
3.5.1	SINTONIZACIÓN	30
3.6	AEROSOLES	31
3.6.1	MATERIAL PARTICULADO 2.5 μM	33
3.6.1.1	Distribuciones de tamaño de los aerosoles	34
3.6.1.2	Fuentes de aerosoles	37
3.6.2	FILTROS	38
3.7	OPTIMIZACIÓN DE CORRIENTE CON MUESTRAS BLANCO	40
3.8	CARACTERIZACIÓN DEL MRC NIST 1648A	41
3.9	TAMAÑO DE PARTÍCULA	42
4	<u>METODOLOGÍA</u>	46
4.1	OPTIMIZACIÓN DE CORRIENTE CON MUESTRAS BLANCO	46
4.1.1	BKBE	46
4.1.2	BEA _{1,2,3}	46

4.1.3	BEAB _{1,2,3}	47
4.1.4	BEBE	47
4.2	OBTENCIÓN DE ¹⁰ Be PRESENTE EN EL MRC NIST 1648 A	48
4.3	DETERMINACIÓN DE ¹⁰ Be EN FILTROS DE AEROSOL DE LA CAMPAÑA UNAM (CU)	49
4.4	REGIÓN DE ESTUDIO	49
4.5	MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN	50
4.6	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	54
4.7	PROCESAMIENTO DE LOS FILTROS	54
4.8	PROCESAMIENTO DE DATOS	59
5	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</u>	<u>62</u>
5.1	OPTIMIZACIÓN DE LA CORRIENTE CON MUESTRAS BLANCO DE ¹⁰ Be	62
5.2	OBTENCIÓN DE ¹⁰ Be PRESENTE EN EL MRC NIST 1648A	72
5.3	¹⁰ Be EN FILTROS DE AEROSOL.....	75
6	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>85</u>
7	<u>REFERENCIAS</u>	<u>86</u>

RELACIÓN DE FIGURAS

FIGURA 1: LÍNEA DE KARMAN. TOMADO DE ((UCAR), 2015)	10
FIGURA 2: CAPAS DE LA ATMÓSFERA. TOMADA DE (OTAOLA, MENDOZA, & PÉREZ, 2013)	14
FIGURA 3: RELACIÓN INVERSA ENTRE EL FLUJO DE RAYOS CÓSMICOS Y LOS MÁXIMOS DE ACTIVIDAD SOLAR. TOMADO DE (REINERS, Y OTROS, 2018)	15
FIGURA 5: DIAGRAMA DE FLUJO DE RAYOS CÓSMICOS. IMAGEN ETIQUETADA PARA REUTILIZARSE DE FORMA NO COMERCIAL.	18
FIGURA 6: SECCIONES TRANSVERSALES PARA ^{10}Be Y ^7Be DE NITRÓGENO (PARTE SUPERIOR) Y OXÍGENO (PARTE INFERIOR). TOMADO DE ((UCAR), 2015)	21
FIGURA 7: ESQUEMA DE UN AMS. TOMADO DE (SOLÍS ROSALES & MARTÍNEZ CARRILLO, 2013) CON MODIFICACIONES	26
FIGURA 8: DISTRIBUCIÓN DE MODOS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA. (MARINO, 2011)	36
FIGURA 9: ESQUEMA DE TRAYECTORIA DEL ^{10}Be EN AMS LEMA (PADILLA S. , 2016)	40
FIGURA 10: SITIO DE MUESTREO. CAMPAÑA 2015 UNAM (CU). (GÓMEZ, Y OTROS, 2016).....	50
FIGURA 11: MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN	51
FIGURA 12: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL MUESTREADOR (REDAIRE. (RED DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE), 2012)..	52
FIGURA 13: PROCESAMIENTO RADIOQUÍMICO DE LOS FILTROS DE CUARZO $\text{PM}_{2.5}$	58
FIGURA 14: COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE LAS MUESTRAS CON SOLO TRAZADOR ^9Be	62
FIGURA 15: CORRIENTES DE LOS ELUIDOS DE LA RESINA ANIÓNICA	63

FIGURA 16: DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES DE LAS RÉPLICAS DE LOS ELUIDOS DE LAS RESINAS ANIÓNICA Y CATIÓNICA.....	63
FIGURA 17: DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES DE ELUIDOS DE LA METODOLOGÍA TRADICIONAL (PROPUESTA POR PADILLA 2015 Y GAITÁN 2018).....	64
FIGURA 18: ESPECTRO DE ELUIDOS OBTENIDOS CON CRISTALERÍA DE BOROSILICATO. LA REGIÓN DE CUENTAS DE ^{10}Be (ZONA OSCURA) SE ENCUENTRA CONTAMINADA POR EL INTERFERENTE ISOBÁRICO ^{10}B Y LOS FRAGMENTOS DE MASA 10.....	65
FIGURA 19: CORRIENTES DE LAS RÉPLICAS ELUIDAS SOLO CON ^9Be USANDO VASOS DE TEFLÓN SUPERPUSTAS CON ELUIDOS DE LA PRIMERA RESINA DE SEPARACIÓN ANIÓNICA.....	66
FIGURA 20: IZQUIERDA: ELUIDO DIRECTAMENTE EN LA RESINA DE SEPARACIÓN ANIÓNICA BeE. DERECHA: ELUIDO RESULTANTE DE LA SEPARACIÓN CATIÓNICA Y ANIÓNICA BeAB.....	67
FIGURA 21: SUPERPOSICIÓN DE LAS CORRIENTES DE LOS ELUIDOS PASADOS POR LA SEGUNDA RESINA DE SEPARACIÓN CATIÓNICA	68
FIGURA 22: DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES DE ELUIDOS DE LA METODOLOGÍA TRADICIONAL (PROPUESTA POR PADILLA 2015 Y GAITÁN 2018).....	69
FIGURA 23: DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES DE ELUIDOS DE LA METODOLOGÍA TRADICIONAL (PROPUESTA POR PADILLA 2015 Y GAITÁN 2018).....	70
FIGURA 24: ESPECTRO CON CRISTALERÍA DE TEFLÓN	71
FIGURA 25: CONCENTRACIONES PROMEDIO DE ^{10}Be EN MRC.....	74
FIGURA 26: COMPARACIÓN DE CONCENTRACIONES DE ^{10}Be (ÁTOMOS/G) DE AEROSOLIOS POR TEMPORADA	79
FIGURA 27A: VARIACIONES ESTACIONALES T1 (FEBRERO, NOVIEMBRE Y DICIEMBRE 2015).....	80

RELACIÓN DE TABLAS

TABLA 1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA. TOMADO DE (DAVID & LEYA, 2019).....	11
TABLA 2: ISÓTOPOS COSMOGÉNICOS.....	20
TABLA 3: RELACIÓN DE FILTROS MEDIDOS EN LA CAMPAÑA UNAM (CU).....	53
TABLA 4: RELACIÓN DE CONCENTRACIONES OBTENIDAS DE LAS 4 RÉPLICAS REALIZADAS DEL MRC NIST 1648A Y UN BLANCO	72
TABLA 5: COMPARACIÓN CON ESTUDIOS SIMILARES	73
TABLA 6: CONCENTRACIONES DE LOS FILTROS DE AEROSOLES OBTENIDAS EN CADA TEMPORADA DE MUESTREO	77
TABLA 7: COMPARACIÓN ENTRE CAMPAÑAS EN CU EN 2012 (GAITÁN, 2018) Y 2015	84

Declaración de autenticidad

En seguimiento al comunicado emitido por la UNAM sobre plagio y ética, la que suscribe, Malvis Robaina Mesa declara conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, asegura mediante su firma al calce, que el presente trabajo es original y enteramente de su autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'MRM', is written over a horizontal line.

Lic. Malvis Robaina Mesa. Ciudad Universitaria, CDMX, 2020

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del comité tutorial Dra. Corina Solís Rosales (Director de Tesis); Dr. Javier Miranda Martín del Campo y Dra. Carmen Grisel Méndez García por aportar tanto conocimiento durante este período de investigación. Sus valiosas recomendaciones fueron siempre bien recibidas y serán aplicadas en investigaciones futuras.

A los miembros del jurado Dra. Corina Solís Rosales, Dr. Javier Miranda Martín del Campo, Dra. Ofelia Morton Bernea, Dr. Santiago Padilla Domínguez, Dra. Rocío García Martínez por el tiempo dedicado a enriquecer mi trabajo escrito con valiosos comentarios y correcciones basados en su vasta experiencia en el campo, gracias a ellos hoy termino siendo una mejor investigadora lista para seguir ampliando mis conocimientos en conjunto con grupos multidisciplinarios de investigación.

A María Rodríguez Ceja, Arcadio Huerta y Sergio Martínez personal imprescindible en el LEMA que sin su apoyo, instrucciones y consejos de vida, no hubiera podido avanzar en esta temática nueva para mí. Muchas gracias por su tiempo, paciencia y amor.

A Santiago Padilla que admiro muchísimo y agradezco haya dedicado de su tiempo para enseñar que la radioquímica es muy versátil y el trabajo en el laboratorio es fundamental al igual que el arte de presentar los resultados obtenidos destacando el objeto de estudio por sobre todas las cosas.

En Especial a la Doctora Corina Solís Rosales por confiar en mí desde que estaba solo aspirando por el posgrado en mi país. Fue más que un apoyo para mí y mi familia y por supuesto fue el mayor soporte e inspiración para realizar esta labor. Las palabras siempre serán pocas para describir todas las horas que me dedicó y aprendí de ella tanto en lo profesional como en lo personal a ser mejor. Al Doctor Efraín Chávez Lomedi que

indirectamente me apoyó en el transcurso de esta estancia investigativa en LEMA y me motivó a seguirlo intentando cuando casi perdí las fuerzas para seguir.

A DGAPA UNAM (proyectos IG100619). Gracias por su apoyo y confianza en la investigación. A CONACyT por la beca y el proyecto 299073 por el apoyo financiero para equipamiento y consolidación del LEMA.

Al Instituto de Física de la UNAM por todos los recursos y facilidades brindados para la realización de este trabajo durante estos años.

A todos gracias por permitirme crecer profesionalmente en lo que me apasiona.

DEDICATORIA

A todos por ser un importante soporte y motivación en esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, mi esposo y mi hijo.

1 RESUMEN

Se propone un estudio de concentraciones de ^{10}Be en filtros de aerosoles urbanos con tamaño de partícula con radio aerodinámico inferior o igual a los $2.5\ \mu\text{m}$. Se realiza una optimización de la corriente en el Espectrómetro de Masas con Aceleradores perteneciente al Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores del Instituto de Física de la UNAM para la determinación de las mejores condiciones para obtener mejor estadística del radioisótopo de interés; seguido de un estudio con una muestra real, en este caso Material de referencia *NIST 1648 a* con características similares con respecto a su tamaño de partícula y modificaciones importantes en el procesamiento de muestra. Se finaliza con un estudio en muestras reales colectadas en una campaña de muestreo realizada en 2015 en Ciudad Universitaria. Se realiza una evaluación de la estacionalidad; así como de la variación de la concentración con las condiciones meteorológicas, debido a las características geográficas del Valle de México. Se evalúa el movimiento de las masas de aire y se realiza una optimización del procesamiento radioquímico de la muestra, paso más importante ya que se procesan masas del orden de los microgramos de muestra que contienen el radioisótopo de interés para el estudio; es importante aislar el radioisótopo de su matriz natural, evitando interferencias y contaminantes. Las gráficas de corriente muestran una pérdida de material importante entre la segunda y tercera resina de separación cromatográfica por intercambio iónico; sin embargo, al modificarse la técnica durante el procesamiento del material de referencia, se logra obtener una mayor concentración de ^{10}Be comparado con el procesamiento tradicional que incluye las tres resinas de separación, sin olvidar que la tercera resina donde se pierde más material, constituye la resina que purifica al berilio de la interferencia de calcio y otros núcleos inorgánicos. Es por esta razón que, al procesar muestras reales, se tuvo en cuenta el procesamiento completo, pero con el amplio conocimiento de qué proporción de ^{10}Be se perdía en esta parte. La optimización del procedimiento radioquímico de la muestra requiere estudios adicionales, pero se realizó un importante avance investigativo en el presente estudio.

2 INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México está operando desde el año 2013 en la determinación de concentraciones de radioisótopos raros con múltiples aplicaciones en las diferentes ramas de la investigación. El ^{10}Be en muestras naturales, objeto de investigación y análisis en el presente trabajo, constituye una nueva línea que se está fomentando en este Laboratorio Nacional desde 2016. Se trata de un isótopo cosmogénico de perentoria importancia en las Ciencias de la Tierra y específicamente en el campo de conocimiento de las Ciencias Atmosféricas, Espaciales y Planetarias. El LEMA, que se erige como el primer Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores en México, está llevando a cabo las medidas de ^{10}Be en muestras naturales, como filtros de aerosoles atmosféricos PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, agua de lluvia, testigos de hielo, sedimentos y rocas volcánicas entre otros. (Méndez, 2015)

El ^{10}Be es un isótopo que se produce cuando los rayos cósmicos inciden sobre la atmósfera de la Tierra, constituida mayoritariamente por ^{14}N (79 %) y ^{16}O (20 %) así como diversos gases y partículas en suspensión que constituyen el (1 %) restante. La interacción de los rayos cósmicos con las partículas de la atmósfera superior, producen una cascada de partículas secundarias que interaccionan de nuevo con las partículas de la atmósfera, produciendo así ^{10}Be atmosférico o meteórico mediante una reacción de espalación en cantidades extremadamente pequeñas, a una tasa de $(0.56-1.23) \times 10^6$ átomos/cm². Su vida media, $T_{1/2}=(1.37\pm 0.07)$ Ma. (Nishiizumi, y otros, 2007)

Aproximadamente 67 % del ^{10}Be atmosférico se produce en la estratósfera y el resto en la tropósfera. El tiempo de residencia del ^{10}Be en la atmósfera es del orden de semanas a varios años, dependiendo de la altitud de la producción (Padilla S. , 2015). Al igual que otros isótopos cosmogénicos, la producción del ^{10}Be

depende de factores extraterrestres (rayos cósmicos y actividad solar) y terrestres (campo magnético, altitud, latitud y clima), por lo que este isótopo es un buen trazador de procesos atmosféricos.

El ^{10}Be atmosférico es el de más reciente producción y puede tener como máximo una edad de dos años. Después de su producción, el berilio elemental cosmogénico forma compuestos como el BeO y $\text{Be}(\text{OH})_2$. Estos compuestos se asocian al material particulado, siendo adsorbidos por la superficie de partículas en suspensión. El ^{10}Be no es capaz de formar compuestos gaseosos en la atmósfera, por lo que el material particulado es el principal medio de transporte del isótopo hacia la superficie terrestre para posteriormente formar reservorios de ^{10}Be meteórico en la superficie. El ^{10}Be *in situ* se produce por la interacción de las partículas secundarias con el Si de la roca donde se deposita y queda atrapado en la estructura cristalina. Como el ^{10}Be es rápidamente captado por las partículas atmosféricas, comparte su ciclo atmosférico de depósito químico húmedo y seco (Rozanski, 1996). El depósito húmedo de ^{10}Be en la superficie terrestre, se lleva a cabo analizando su concentración en agua de lluvia y el depósito seco en las partículas del aire en suspensión. (Padilla S. , 2015)

El ^{10}Be es un importante trazador de intercambio de masas de aire entre la estratosfera y la troposfera. (Rozanski, 1996) Sin embargo, se reportan escasos estudios dedicados a la asociación de este isótopo cosmogénico con los aerosoles atmosféricos, en particular aquellos de pequeño diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2.5 micrómetros ($<\text{PM}_{2.5}$), y su variación espacial y temporal en zonas urbanas.

Aunque se dispone de estándares de concentración conocida para el análisis del ^{10}Be por AMS, estándares de material particulado en la atmósfera como el *NIST 1648 a* (González & Watters, 2011), no reportan la concentración de ^{10}Be , por lo que un paso importante en el estudio del contenido de ^{10}Be en el material particulado es establecer y posteriormente validar la metodología para cuantificar el contenido de ^{10}Be en un estándar de aerosoles urbanos certificado. En esta tesis se presentan los primeros pasos de este estudio en curso.

En estudios previos se ha demostrado que es posible determinar el ^{10}Be en la fracción de PM_{10} en aerosoles de la CDMX mediante la técnica analítica Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS por sus siglas en inglés). (Méndez García, y otros, 2019) En este trabajo se aborda la determinación de ^{10}Be presente en la fracción $\text{PM}_{2.5}$ de aerosoles colectados en la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), con una mayor proporción esperada de compuestos carbonosos y sulfatos relativa a la fracción PM_{10} . (Gaitán, 2018)

El problema científico que se desea resolver en esta investigación consiste en la detección y análisis del ^{10}Be en muestras de radio aerodinámico menor a 2.5 micrómetros, por lo que se hace necesario optimizar las condiciones de medida con la técnica de AMS y posteriormente implementar un protocolo de preparación de muestras que garantice el máximo recobro del ^{10}Be en matrices naturales

En la presente tesis se experimentaron diferentes métodos de preparación de material particulado urbano de referencia y aerosoles atmosféricos en filtros de cuarzo hasta encontrar aquél que produjera corrientes altas y estables, asegurando una alta sensibilidad de la medida de ^{10}Be en el acelerador.

2.1 Objetivo

Determinar la concentración de ^{10}Be en material particulado de aerosoles atmosféricos mediante AMS.

2.1.1 Objetivos específicos

- Determinar si las variaciones en el procesamiento radioquímico de la muestra afectan la determinación de las concentraciones finales.
- Realizar la optimización de la corriente de ^9Be en muestras blanco, para lograr la máxima sensibilidad que permita la detección y medida del ^{10}Be en muestras pequeñas.
- Determinar la concentración de ^{10}Be en el material certificado de referencia de aerosol urbano *NIST 1648 a* con modificaciones en el tratamiento radioquímico de la muestra.

- Cuantificar el ^{10}Be en los aerosoles atmosféricos ($\text{PM}_{2.5}$) colectados en la campaña UNAM CU 2015, en la Ciudad de México.
- Comparar las concentraciones de ^{10}Be en las diferentes temporadas de muestreo en la campaña 2015 e identificar las variaciones estacionales del isótopo.
- Comparar las concentraciones obtenidas de ^{10}Be en $\text{PM}_{2.5}$ con aquellas obtenidas previamente para PM_{10} en una campaña realizada en 2012, en la Ciudad de México.

2.2 Hipótesis

Es posible medir ^{10}Be en material particulado de un aerosol atmosférico de referencia con espectrometría de masas con aceleradores, y utilizar dicha metodología para determinar la cantidad de ^{10}Be en aerosoles atmosféricos $\text{PM}_{2.5}$

3 MARCO TEÓRICO

3.1 *Atmósfera terrestre y su composición química*

La atmósfera es una capa gaseosa de 100 km de espesor que rodea a la Tierra. La mayor parte de su masa se encuentra en los primeros 16 km desde la superficie, ya que su espesor se adelgaza con la altura. No existe un límite definido entre la parte superior de la atmósfera y el espacio; sin embargo, diversos estudios reflejan que la atmósfera y el espacio exterior se dividen con una línea imaginaria, llamada línea Karman para efectos de aviación y astronáutica, que se ubica aproximadamente a 100 km de la superficie. Este concepto está relacionado con la altitud, calculando la altura a la que la densidad de la atmósfera se vuelve muy baja. Los gases atmosféricos refractan la luz con longitud de onda del azul más que cualquier otra longitud de onda de la luz visible, haciendo que aparezca un halo azul en los límites de la Tierra. Donde acaba el halo, acaba la atmósfera y empieza el espacio exterior. **Figura 1.** ((UCAR), 2015)



FIGURA 1: Línea de Karman. Tomado de ((UCAR), 2015)

La atmósfera se compone principalmente de una mezcla de gases que no reaccionan químicamente entre sí; vapor de agua y una gran variedad de partículas en suspensión o polvo atmosférico. La composición química de los gases que la conforman a 72 km de altura se muestra en la **Tabla 1**.

TABLA 1: Composición química de la atmósfera. Tomado de (David & Leya, 2019)

Elemento	Abundancia (%)
N₂	78.084
O₂	20.946
Ar	0.934
CO₂	0.033
H₂	0.00005
CH₄	0.00002
N₂O	0.00005
otros gases inertes	0.00256

Se observa que el N₂ es un gas inactivo que comprende aproximadamente el 78 % de la atmósfera y ocupa más de las tres cuartas partes del aire por volumen; mientras que el O₂, es un gas muy reactivo químicamente y el segundo compuesto más abundante, que ocupa una quinta parte del aire, por volumen. A pesar de su actividad química, la cantidad de oxígeno en el aire permanece prácticamente constante. Esto hace que entre el N₂ y el O₂ cubra aproximadamente el 99 % del aire, por lo que el resto de los compuestos constituyen solo un 1 % de la atmósfera. De cualquier manera, la importancia del CO₂ no es despreciable para la Tierra, desde el punto de vista climático y biológico. El vapor de agua permite que las moléculas interactúen con la misma libertad de movimiento que un gas. Durante su condensación libera calor latente que suministra energía para la

formación de tormentas. Las partículas en suspensión provienen, en su mayoría, de la superficie terrestre debido a la acción de los vientos y las erupciones volcánicas. Estas últimas pueden llegar a reducir la radiación solar directa en un 25 % o 30 % sobre una amplia banda de latitudes y una redistribución puede llegar a reducir la pérdida total de radiación a porcentajes menores del 5 %. (K. S. Carslaw, 2002)

3.1.1 Estructura de la atmósfera

La atmósfera de la Tierra posee una estructura en capas con límites definidos arbitrariamente, nombradas de acuerdo con la altura sobre la superficie y las propiedades físicas y químicas que varían en cada capa según el comportamiento de los parámetros presión, densidad, temperatura y composición del aire. La presión decrece paulatinamente con la altura, por un valor de 1 atm desde el nivel del mar hasta aproximadamente 150 km de altura; más allá de ese nivel lo hace más gradualmente. La densidad de masa y el número de densidad decrecen con la altura de la misma manera; no obstante, la variación de la temperatura, es mucho más compleja, ya que presenta dos mínimos a 15 km y 80 km de altura; por encima de este nivel, aumenta monótonamente. Las capas de la atmósfera, según la variación de la temperatura, son: (Otaola, Mendoza, & Pérez, 2013)

- a) Troposfera: capa donde la temperatura decrece constantemente con la altura a razón de 6.5 °C por cada km de altura. Contiene casi la totalidad del vapor de agua de la atmósfera, se forman casi todas las nubes, la precipitación pluvial, las tormentas y todos los fenómenos que determinan el tiempo atmosférico.
- b) Estratosfera: en esta capa se encuentra la mayor parte del O₃ atmosférico y su capacidad de absorción de la radiación hace que la temperatura aumente ligeramente con la altura hasta 50 km
- c) Mesosfera: esta capa se extiende hasta una altura de 80 km y está sometida a fuertes variaciones estacionales de la temperatura a altas latitudes.

- d) Termosfera: la temperatura aumenta constantemente hasta unos 227 °C en la noche durante el mínimo de actividad solar, y por encima de 1476.85 °C en el día durante el máximo de actividad solar.
- e) Exosfera: esta capa es ilimitada y se extiende hasta la región del espacio extraterrestre. Está asociada con la interacción del viento solar y con el campo geomagnético. La temperatura se comporta como una isoterma en su variación con la altura.
- f) Ionosfera: se extiende desde la Mesosfera hasta los límites más externos de la atmósfera. Por encima de cierto nivel, la atmósfera está expuesta a radiación ultravioleta, rayos X y partículas solares que producen partículas cargadas eléctricamente, que son afectadas por el campo magnético de la Tierra y se comportan de manera diferente que las partículas neutras en el aire, dando lugar a la formación de iones de varias clases de átomos, electrones y moléculas en una atmósfera neutra.

La **Figura 2** muestra las capas atmosféricas y su espesor aproximado. (Reiners, y otros, 2018) (Rozanski, 1996)

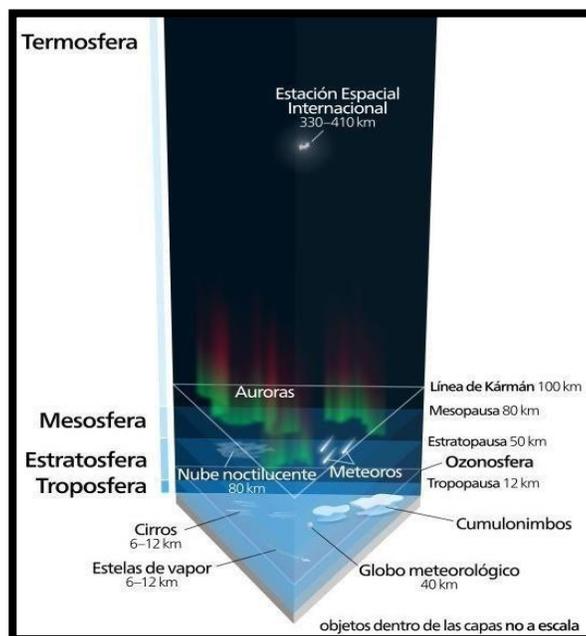


FIGURA 2: Capas de la atmósfera. Tomada de (Otaola, Mendoza, & Pérez, 2013)

3.2 Los rayos cósmicos

Forman parte de la escala de variación terrestre. Su intensidad varía según se comporte el campo magnético interplanetario. Cuando el Sol está en su máximo de actividad, las irregularidades actúan como obstáculos al flujo de los rayos cósmicos y menos partículas penetran a nuestra atmósfera, sin embargo, cuando la actividad solar disminuye al mínimo hay menos irregularidades que dispersen los rayos cósmicos y éstos penetran en mayores cantidades a la atmósfera, produciendo a su vez, más isótopos cosmogénicos. La observación de estas irregularidades ocurre cada 10000 años aproximadamente. (Reiners, y otros, 2018) La **Figura 3** muestra la modulación del flujo de rayos cósmicos galácticos que llegan a la Tierra. Se observa cómo durante los máximos de actividad solar existe una reducción de alrededor de un 20 % en dicho flujo. (McDowell, 2018)

Una buena parte del flujo de muones se asocia al Sol. Por otro lado, en las horas centrales del día, cuando el Sol está más alto, los muones atraviesan un menor espesor de capa atmosférica que al amanecer o atardecer, por lo que cabe esperar un ligero aumento en la tasa de detección de muones en dichas horas centrales.

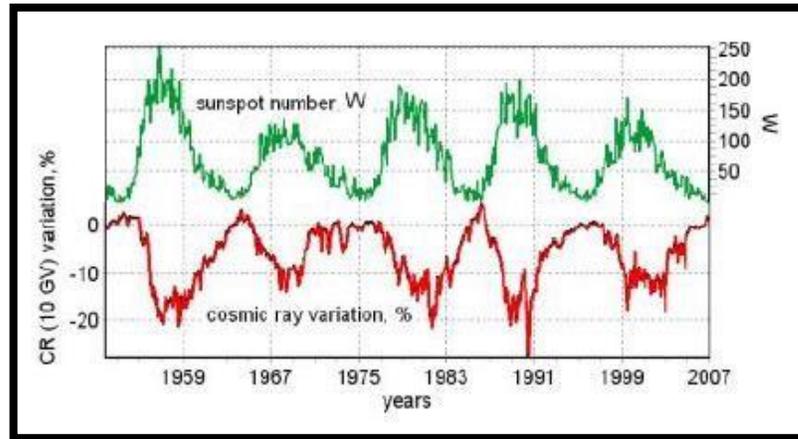


FIGURA 3: Relación inversa entre el flujo de rayos cósmicos y los máximos de actividad solar. Tomado de (Reiners, y otros, 2018)

Los rayos cósmicos son partículas cargadas de alta energía que penetran la Tierra en ráfagas de dos formas fundamentales, primaria y secundaria. Los rayos cósmicos primarios, pueden ser de procedencia solar (0.1 - 100) MeV, siendo esta la fuente principal de rayos cósmicos que llegan a la Tierra, con energías menores que las de fuentes galácticas. Durante las explosiones de supernovas, eventos donde se libera una gran cantidad de energía en muy poco tiempo, se produce una onda de choque que acelera las partículas que se encuentran en su entorno hasta velocidades próximas a la de la luz, con energías de hasta ($10^3 - 10^6$) TeV dando lugar a la formación de rayos cósmicos galácticos. La procedencia galáctica de los rayos cósmicos se encuentra en el rango de energía ($100 - 10^4$) MeV. Esta fuente, forma los rayos cósmicos de más alta energía y requieren otras fuentes más potentes, por lo que se tienden a producir en las regiones cercanas a los agujeros negros supermasivos que hay en el centro de las galaxias. (K. S. Carslaw, 2002)

Los rayos cósmicos están formados principalmente de protones (~89 %) y una cantidad variable de partículas alfa (~10 %) y otras partículas minoritarias dependiendo de su procedencia. Las partículas cargadas llegan a la tierra de forma isotrópica con trayectorias aleatorias. Son muy energéticas, con velocidades cercanas a la de la luz y pueden alcanzar hasta 10^8 TeV. Cuando los rayos cósmicos inciden sobre la atmósfera, colisionan con las moléculas del aire, con tan alta energía que tienden a producir reacciones de creación de piones que posteriormente se desintegran y emiten otras partículas que producen una cascada de reacciones nucleares de espalación con una componente electromagnética donde se van emitiendo fotones, electrones y positrones. Los rayos cósmicos secundarios tales como protones, neutrones, electrones, neutrinos, muones, etc., se forman debido a su interacción con la atmósfera. (Otaola, Mendoza, & Pérez, 2013)

La componente muónica es muy importante para nuestro estudio, porque de ella va a depender la producción del ^{10}Be meteórico. La vida media de un muón es de unos $2 \mu\text{s}$ lo que supone que, moviéndose a una velocidad de $0,998 c$, recorrería tan solo 600 m desde que es generado en las capas altas de la atmósfera, por lo que sería imposible detectarlos al nivel del mar, cosa que, sin embargo, es muy habitual. Esto se explica por su período de semidesintegración, que, en el sistema de referencia de la Tierra, se multiplica por el factor γ que para esa velocidad tiene un valor de 15.8, lo que supone dilatar su período de semidesintegración hasta $31.6 \mu\text{s}$ en dicho sistema de referencia. Esto le permitiría recorrer unos 9500 m, lo que justifica su detección en la superficie terrestre. (Otaola, Mendoza, & Pérez, 2013) Existe un flujo mayor de incidencia de rayos cósmicos en las regiones polares que en las ecuatoriales, ya que, en estas regiones, las líneas del campo magnético terrestre entran hacia la superficie, facilitando la entrada de los rayos cósmicos. El flujo total de partículas tiene un máximo a una altitud de aproximadamente 20 km y por debajo de esta altitud el flujo decrece exponencialmente. (Ruiz, 2012) Los rayos cósmicos primarios pueden ser detectados de forma directa en globos y satélites o de forma indirecta con dispositivos en el suelo. En la **Figura 4** se observan las técnicas de detección indirecta de rayos cósmicos, dependiendo de la componente que se quiera estudiar (hadrónica, muónica o electromagnética (Estupiñán López, Nunez, & Asorey, 2015)

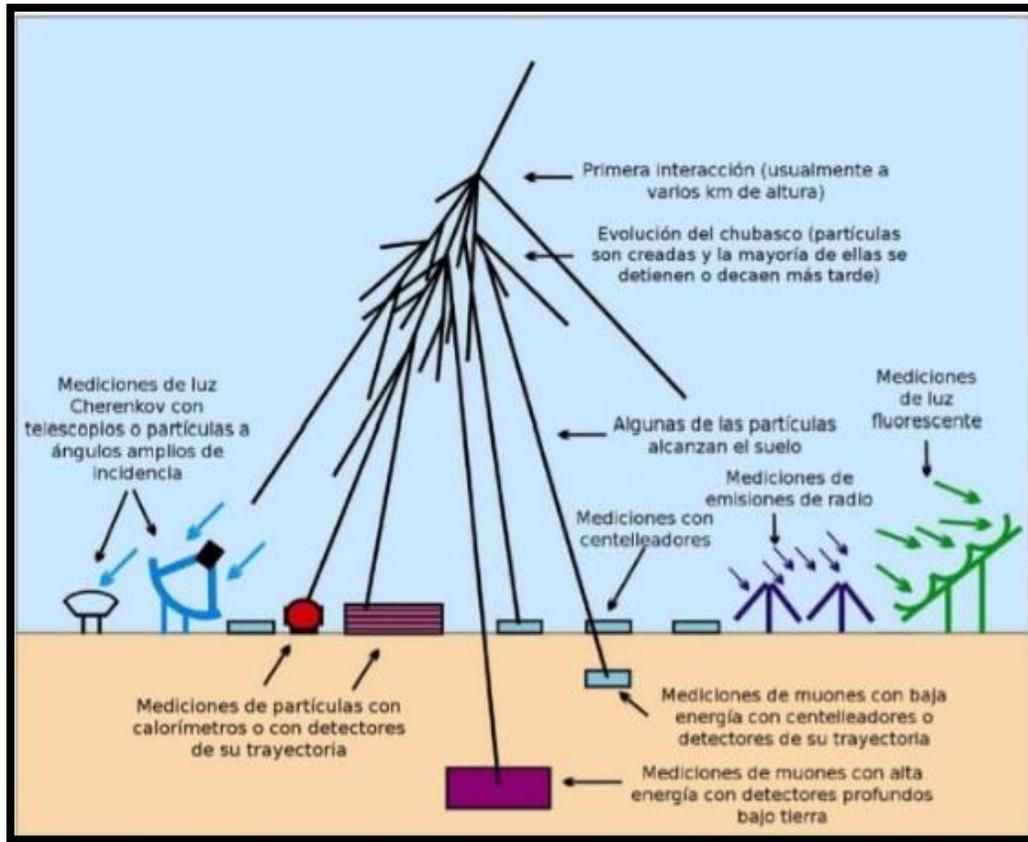


Figura 4: Técnicas de detección indirecta de rayos cósmicos. Tomado de (Haungs, 2009)

El estudio de la influencia de los rayos cósmicos sobre la tierra, permite estudiar registros históricos más allá del tiempo. ((UCAR), 2015) Algunos de los piones formados interaccionan con los núcleos de las moléculas de aire mediante una interacción fuerte, mientras que otros decaen espontáneamente, mediante una interacción débil, en muon y neutrino o antineutrino (Coughlan, Dodd, & Gripiaios, 2006).

Los elusivos neutrinos son muy difíciles de detectar. Los muones, sin embargo, al ser partículas masivas cargadas pueden detectarse por sus efectos ionizantes al atravesar medios densos. (Gary W. vanLoon, 2018)

La **Figura 5** muestra la relación entre el flujo de muones y su energía, de modo que se diferencian tres regiones: aquella de más baja energía (amarillo) se asocia a muones procedentes mayoritariamente del Sol, mientras que la de energía mediana correspondería a muones procedentes de nuestra propia galaxia (azul). Finalmente, los muones de mayor energía proceden del espacio extra galáctico (rosa). (Halzen, 1984)

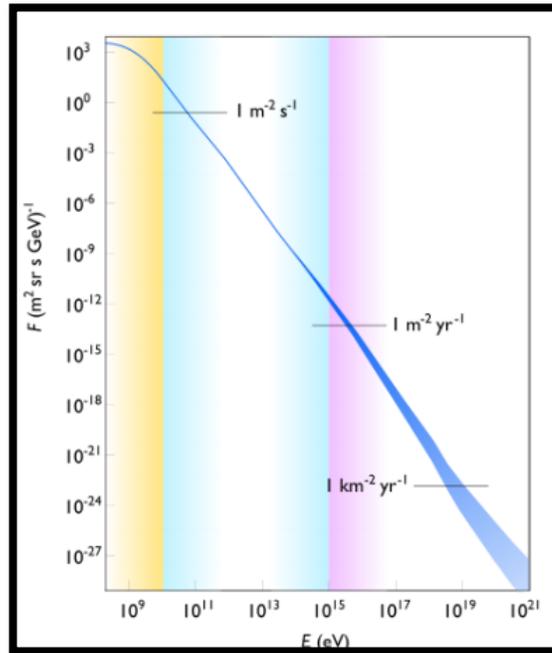


FIGURA 4: Diagrama de flujo de rayos cósmicos. Imagen etiquetada para reutilizarse de forma no comercial.

La temperatura atmosférica varía en las distintas estaciones; en consecuencia, también lo hace la densidad atmosférica. Dado que la tasa de muones viene determinada por las interacciones de las partículas cargadas de los rayos cósmicos con las moléculas del aire, cabe esperar variaciones en dicha tasa según las estaciones. Teniendo en cuenta los procesos en cascada descritos en el fundamento teórico, la vida media de los muones y sus mecanismos de decaimiento, es previsible esperar una mayor tasa de muones en zonas de alta montaña, y, por tanto, de ^{10}Be meteórico.

3.2.1 Radioisótopos cosmogénicos

La producción de los radionúclidos cosmogénicos es mayor a altas elevaciones de la atmósfera y en la parte superior de la corteza, disminuyendo con la altitud y profundidad. Después de ser producidos los radionúclidos, siguen la trayectoria de las masas de aire convertidos en gases tales como el $^{14}\text{CO}_2$ o se adhieren a partículas de tamaño con órdenes de micrómetros, aerosoles, como en el caso del ^{10}Be . Estos isótopos bajan hasta la parte inferior de la atmósfera, entrando en contacto con los seres vivos. Una vez allí, los isótopos adheridos a los aerosoles se incorporan al suelo directamente por medio del depósito químico seco o húmedo (lluvia), respectivamente, mientras que los gases se depositan directamente en el mar. (Padilla S. , 2015)

La producción de ^{10}Be va a depender de la variabilidad del campo magnético terrestre (latitud), la altitud, la profundidad y la topografía. En las geociencias, la geocronología mediante el estudio del ^{10}Be ha permitido resolver interrogantes que no habían sido resueltas en estudios anteriores. Puede ser empleado con el ^{26}Al para estudiar procesos que resultan de una historia compleja de exposición. Debido al tiempo de vida medio del isótopo ^{10}Be , (HOFMANN, y otros, 1987) es posible estudiar procesos ocurridos durante el Cuaternario y el Plioceno Tardío. (ANGEL I., 2013). Es un radionúclido escaso en la naturaleza que se produce en la estratosfera inferior y troposfera superior. Comparando su producción con el ^{26}Al y el ^{14}C , la del ^{10}Be es mayor ya que el ^{26}Al depende de la abundancia de su padre isotópico para su formación, el cual constituye el 1% de la atmósfera y el ^{14}C tiene una producción más lenta por el ciclo del carbono que requiere más tiempo para dar respuesta a cambios de producción a corto plazo. (Padilla S. , 2015)

El estudio de la información que brindan las irregularidades del campo magnético, la penetración de los rayos cósmicos y la producción de los isótopos cosmogénicos se lleva a cabo a partir de registros naturales que almacenan esta información a lo largo del tiempo. Estos son testigos de hielo de las capas polares que con el ^{10}Be y el ^{36}Cl , caracterizan la composición y el espesor de las capas de hielo depositadas, en las que se puede estudiar épocas que se remontan hasta 10 000 años; también en los sedimentos de las profundidades marinas,

donde el cociente isotópico entre el ^{10}Be y el ^{26}Al y la concentración de estos isótopos de manera individual brinda valiosa información sobre las características del clima de diferentes épocas por varios millones de años. (David & Leya, 2019)

La **Tabla 2** muestra los isótopos cosmogénicos más importantes por sus aplicaciones en Ciencias de la Tierra. (Hughes, 1991)

TABLA 2: Isótopos cosmogénicos.

ISÓTOPO PRODUCIDO	PERÍODO (AÑOS)	PRODUCCIÓN MEDIA (átomos/m ² x año)	CANTIDAD TOTAL DE SUPERFICIE TERRESTRE
^3H	12.33	1.6×10^{11}	7 kg
^{10}Be	1.6×10^6	1.26×10^{10}	430 t
^{14}C	5.73	7.0×10^{11}	75 t
^{26}Al	7.2×10^5	4.8×10^7	1.1 t
^{32}Si	104	5.0×10^7	2 kg
^{35}S	0.24	4.8×10^8	4.5 g
^{36}Cl	3.01×10^5	5.0×10^8	15 t
^{39}Ar	269	4.2×10^{11}	

La **Figura 6** muestra una curva que representa una sección transversal en función de la energía, a menudo se denomina función de excitación. Típicamente, una función de excitación comienza en un umbral de energía correspondiente a la energía mínima requerida para que ocurra esta reacción.

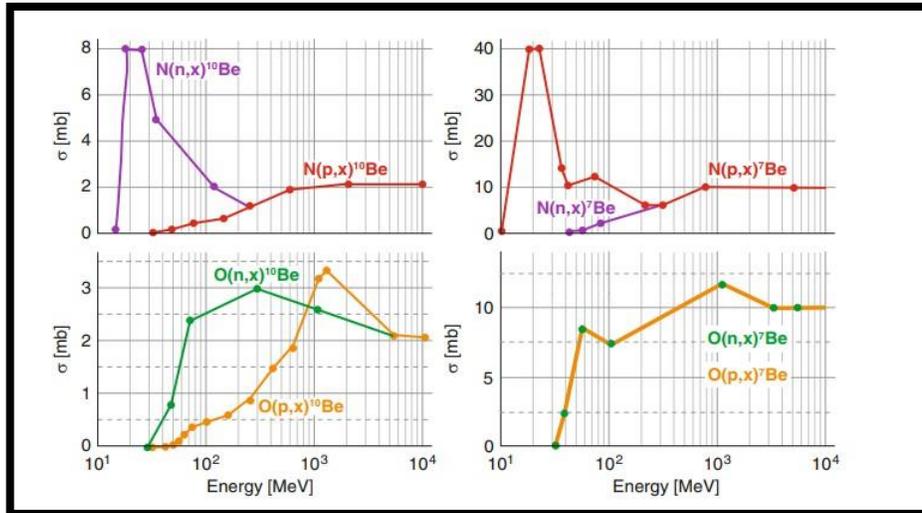


FIGURA 5: Secciones transversales para ¹⁰Be y ⁷Be de nitrógeno (parte superior) y oxígeno (parte inferior).

Tomado de ((UCAR), 2015)

Después de un aumento relativamente pronunciado, se alcanza un máximo. Un aumento adicional en la energía generalmente conduce a una ligera disminución debido al inicio de reacciones adicionales en competencia.

Los umbrales para las reacciones están entre (20 - 30) MeV para ¹⁰Be y 10 MeV para ⁷Be. Los valores más grandes son 8 mb en el caso de ¹⁰Be y 40 mb en el caso de ⁷Be. Aunque todas las secciones transversales para ¹⁰Be se acercan a 2 mb a altas energías, se aproximan a 10 mb para ⁷Be. Estas diferencias indican que la tasa de producción de ⁷Be es mayor que la de ¹⁰Be. Con umbrales más altos, se alcanza un estado estable y la sección transversal se vuelve independiente de la energía (Hughes, 1991)

3.3 ^{10}Be

Este isótopo cosmogénico mononuclídico se forma de manera natural como resultado de la espalación de rayos cósmicos con núcleos atómicos ligeros como el oxígeno y el nitrógeno. Como resultado de esta colisión, se expulsan nucleones que forman a su vez más elementos en las altas capas de la atmósfera, como es el caso del ^{14}C , el cual fue el primer isótopo cosmogénico estudiado a finales de 1940 con amplias aplicaciones en la arqueología, geoquímica, hidrología y oceanografía, así como métodos de datación. En general, los isótopos cosmogénicos tienen aplicaciones en los estudios de datación del tiempo de exposición de los meteoritos de origen lunar y marciano a rayos cósmicos. Estos estudios permiten entender mejor la dinámica de los cuerpos pequeños en el sistema solar; por ejemplo, se puede comprobar si los meteoritos muestreados provienen de la misma roca madre o si fueron eyectados producto de una colisión previa, o se formó como resultado de colisiones consecutivas. La producción de isótopos cosmogénicos depende de la altitud y la latitud geomagnética y la composición química de la matriz, así como de las características de la atmósfera en el lugar de muestreo (David & Leya, 2019)

Para que se formen isótopos cosmogénicos estables y radiactivos a partir de estas reacciones de espalación, los rayos cósmicos que incidan deben tener características específicas, en primer lugar, la producción del radionúclido de interés debe ser baja o tener un $T_{1/2}$ menor que el $T_{1/2}$ del sistema solar. En el caso del ^{10}Be los principales elementos blanco que lo forman son O, Mg, Al, Si, Ca, Fe, Ni. En general, la producción de ^{10}Be es principalmente a través de reacciones de espalación de O, sin embargo, parte de la producción es a través de reacciones de espalación en Mg, Al, Si y Ca. El ^{26}Al se produce predominantemente mediante reacciones de espalación en ^{27}Al y Ar. En algunos minerales “blanco”, la producción de otros elementos también puede ser importante. Para ambos nucleidos también hay producción a través de muones negativos detenidos y muones rápidos. Ambos nucleidos se usan generalmente para la datación por exposición, especialmente para historiales de exposición complejos y para la fecha de entierro. (David & Leya, 2019)

Las combinaciones más relevantes en la producción de núclidos cosmogénicos en meteoritos, varía entre diferentes tipos de meteoritos. Por citar un ejemplo, mientras el ^{10}Be y el ^{14}C se forman predominantemente en meteoritos pedregosos a partir del oxígeno por reacciones de energía media, la producción de ^{10}Be y ^{14}C en meteoritos de hierro se realiza a través de reacciones de alta energía a partir de hierro y níquel, lo que resulta en tasas de producción mucho más bajas. En contraste, hay más producción de ^{53}Mn por gramo en meteorito de hierro que por gramo de meteorito pedregoso simplemente debido a la mayor concentración de los elementos blancos que lo forman, en este caso hierro y níquel. (David & Leya, 2019)

El rango de radionúclidos cosmogénicos útiles, varía dependiendo de su $T_{1/2}$ desde el ^{14}C con 5730 años hasta ^{53}Mn con 3.7 Ma. Los estudios in situ emplean ^{10}Be y ^{26}Al producidos en cuarzo.

Los umbrales para la producción de ^{10}Be a partir de nitrógeno son aproximadamente 15 MeV para los neutrones y 33 MeV para los protones. En el caso de la producción de ^{10}Be a partir de oxígeno, el umbral para ambos nucleones es de aproximadamente 30 MeV. Por tanto, la reacción de neutrones con nitrógeno es la más importante para la producción de ^{10}Be . A energías superiores a unos pocos cientos de MeV, todas las secciones transversales se aproximan a un valor constante. (Coughlan, Dodd, & Gripaos, 2006)

El ^{10}Be es un radionúclido muy escaso en la naturaleza y se encuentra normalmente en los lugares donde se produce a partir de los rayos cósmicos con la atmósfera, agua, tierra o minerales de rocas. (Padilla S. , 2015) Comparado el $^{10}\text{Be}_{\text{met}}$ con el terrestre, su producción es reciente y puede permanecer en la atmósfera de uno a dos años. El ^{10}Be meteórico ($^{10}\text{Be}_{\text{met}}$) se emplea para estudiar el amplio espectro de procesos geológicos y ambientales. Es una especie reactiva a las partículas que se adhiere rápidamente a los aerosoles atmosféricos. Existen diferentes maneras de depósito químico de las partículas en el suelo. En el depósito químico seco, las partículas de los aerosoles se depositan en el suelo al adherirse a pequeñas partículas sólidas, en ausencia de precipitación. El depósito químico húmedo se puede producir mediante dos procesos: *rainout* y *washout*. En el proceso de *rainout*, la partícula de aerosol se incorpora a una gota de agua de lluvia que ya existía previamente

en la atmósfera, durante su caída. En el proceso de *washout*, la partícula de aerosol actúa como núcleo para la condensación de gotas. Por lo tanto, la principal diferencia entre ambos procesos es la pre-existencia de la gota de agua. (González & Watters, 2011) El ^{10}Be se deposita en el suelo tanto por depósito químico húmedo como por depósito químico seco. Se adhiere fuertemente a las partículas y es altamente retentivo en la mayoría de los suelos con un alto grado de pH neutro a alcalino, aunque se conserva imperfectamente en los suelos ácidos o arenosos. (Brook, 1997) Se produce principalmente en la estratosfera. El depósito químico en la superficie representa una combinación de la producción atmosférica y el intercambio estratosfera-troposfera, con un máximo en latitudes medias. (Jane K. Willenbring, 2009)

La tasa de producción del $^{10}\text{Be}_{\text{met}}$ depende del campo magnético enriquecido en He proveniente del sol y de los campos geomagnéticos de la tierra, esta característica es ventajosa en el estudio de sedimentos y testigos de hielo que brindan importante información sobre las variaciones del campo magnético en el pasado hasta 10^5 años atrás y en general es muy útil en estudios de la física del sol. Este radionúclido es usado en la datación de sedimentos, tasas de erosión y de paleodenudación. (David & Leya, 2019)

Según Graly y colaboradores en 2010, el ^{10}Be es un trazador potencial de procesos que opera a escalas de tiempo por encima de 10^7 años. Esto lo distingue del radioisótopo ^7Be ($T_{1/2} = 53,2$ días) que, debido a su corto período de semidesintegración o vida media, sólo puede datar sistemas de eventos recientes. El estudio de este radionúclido en muestras naturales procedentes de agua de lluvia, nieve y filtros atmosféricos ofrece valiosa información relacionada con su producción y distribución en la atmósfera. Las ventajas de la variedad de ^{10}Be meteórico frente al producido *in situ* consisten en que las concentraciones son dos órdenes de magnitud más altas (Beer, McCracken, & von Steiger, 2012), lo que requiere de pequeñas cantidades de muestra para su análisis. Las concentraciones se determinan según la naturaleza de la matriz de donde se extrae el ^{10}Be . Por ejemplo, en aerosoles se reporta en (átomos/ m^3 de aire recogido) (Padilla S. , 2015). En el presente trabajo se reporta en átomos/g y átomos / m^3 , es decir, átomos por gramos de muestra depositada en el filtro y átomos por metros cúbicos de aire muestreado.

3.4 Espectrometría de Masas con Aceleradores

A diferencia de la espectrometría de masas convencional, AMS permite la completa supresión de las interferencias isobáricas moleculares y la discriminación de las interferencias isobáricas atómicas. Esto es posible gracias a la alta energía de las partículas que permite el uso de sistemas de detección propios de la física nuclear. Es una herramienta ultrasensible para la determinación de relaciones isotópicas con relaciones tan bajas como 10^{-16} en muestras que contienen tan poco como 10^4 átomos del radionucleido raro, esto permite que se puedan cuantificar núclidos cosmogénicos en matrices separadas radioquímicamente de menos de un miligramo, en lugar de las decenas o cientos de gramos requeridos para el método de conteo por desintegración. El primer Espectrómetro de Masas con Aceleradores se empleó por Müller, en 1977 en la Universidad de California para estudios con ^3H con un ciclotrón; posteriormente se empleó en mediciones de ^{14}C en la Universidad de Rochester and McMaster. (Young, 2001)

Es una técnica versátil que posibilita la medición de los radionúclidos cosmogénicos, como el ^{10}Be . Es de utilidad en múltiples disciplinas, utilizando en cada una de ellas un radionúclido cuyo período de semidesintegración resulte adecuado para el problema a estudiar (^{14}C en arqueología, ^{10}Be en geología, ^{53}Mn y ^{60}Fe en astrofísica, etc.). El principio general del AMS consiste en que los iones se aceleran a alta energía (MeV) y se eliminan los electrones para reducir las interferencias moleculares. Inmediatamente, las partículas se separan por masa y carga en un sector magnético y transitan a través de una serie de elementos selectivos adicionales denominada lentes. Seguidamente, las partículas se separan mediante filtros magnéticos y electrostáticos para pasar al detector. La detección del ^{10}Be se facilita en el detector, donde se separan las interferencias que hasta este punto viajaron en el haz. Esto se puede observar en un diagrama bidimensional con el ánodo ΔE , E_{res} , ya sea en estado sólido o en un detector de ionización de gas. (Ruiz, 2012)

Para obtener las cuentas en las áreas correctas, se debe realizar la sintonización para hallar el valor óptimo para el ^{10}Be , es importante además, la presión del gas inerte porque brindará una mejor separación de los isóbaros

en el detector. Es en este detector donde se puede observar la separación entre el ^{10}B y el ^{10}Be , de esta manera se comprueba la importancia de tener un equipo de tanta sensibilidad para realizar este tipo de estudio para muestras pequeñas. (Young, 2001)

El AMS, está formado por tres zonas fundamentales: la zona de baja energía; el acelerador y la zona de alta energía. La **Figura 7** muestra un esquema general de una instalación de AMS.

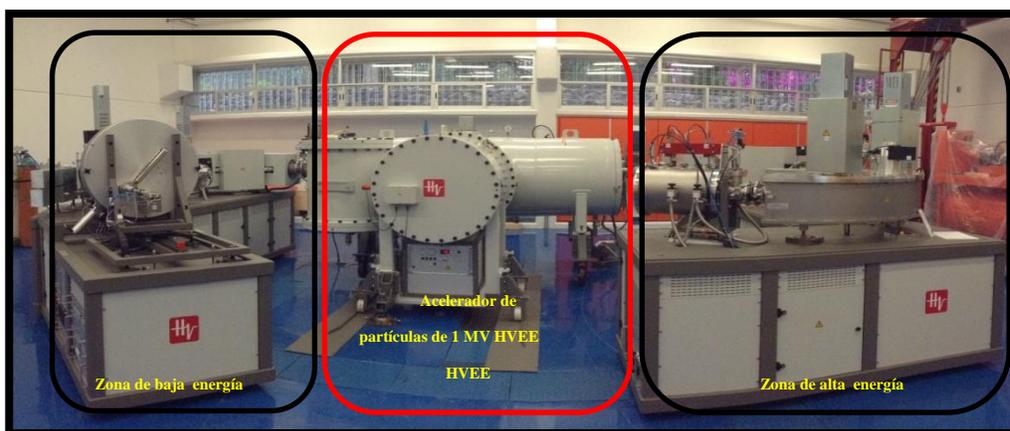


FIGURA 6: Esquema de un AMS. Tomado de (Solís Rosales & Martínez Carrillo, 2013) con modificaciones

En la zona de baja energía, se encuentra la fuente de iones donde se insertan los cátodos que contienen las muestras a analizar, que se bombardean mediante un proceso de sputtering con átomos de Cs. Esto es, se hacen incidir cationes de Cesio (Cs^+) en las muestras para generar iones negativos atómicos o moleculares que contengan el elemento de interés. Seguidamente el haz pasa por el sistema de inyección, que está formado por una diferencia de potencial establecida entre el cátodo y una lente de extracción que acelera a las partículas hacia un primer imán. Al estar en presencia de los vapores de Cesio los átomos o moléculas con electronegatividad positiva irán arrancando electrones a los átomos de Cesio quedando 1 o 2 veces ionizados. Produciendo de esta manera más iones positivos de Cesio que irán a bombardear a la muestra. Por otro lado, los iones con carga negativa recién formados son atraídos por un voltaje de extracción. En este punto se

realiza la primera selección de los iones de interés según su relación M/q (masa/carga eléctrica). Una vez que estos iones son deflectados por este imán de 90°, pasan al acelerador, donde la tensión positiva de la terminal los acelera hasta el intercambiador de carga (*stripper*), donde pierden su carga negativa, dando lugar a una distribución de carga positiva (proceso de stripping). En esta etapa ocurre además el rompimiento de las moléculas formadas y extraídas de la fuente de iones y se eliminan de esta forma los isóbaros moleculares. Los iones positivos de dicha distribución son ahora acelerados a la zona de alta energía, donde el haz es nuevamente desviado a 90° mediante deflectores magnéticos y eléctricos. Existe una gran variedad de haces dispersos o componentes del haz, que lo acompañan y que se van transmitiendo. Todos estos componentes adicionales del haz son contaminantes interferentes y aunque ocurren en cantidades muy pequeñas, generalmente despreciadas, necesitamos tener en cuenta que nuestro haz es muy poco intenso y cualquier contaminante puede convertirse en un serio problema por lo cual es necesario agregar filtros adicionales.

En el caso del ^{10}Be , hasta este punto se encuentran en el haz tanto el ^{10}Be como su isóbaro interferente ^{10}B y pasa por un deflector electrostático, ubicado inmediatamente después del magnético que realiza un análisis E/q (Energía/carga eléctrica). En este haz, aún no se elimina el núcleo interferente ^{10}B , ya que tiene las mismas características cinemáticas y su señal es indistinguible en el detector. Al pasar al sistema de detección, se separan los isóbaros dependiendo de su poder de frenado: (Knoll, 2000)

$$S(E) = -\frac{dE}{dx}$$

Según plantea la fórmula de Bethe-Bloch $S(E) = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \right) \right] - \beta^2$, $\beta = \frac{v}{c}$

Donde:

v : Velocidad de la partícula

E: Energía de la partícula

x: Distancia atravesada por la partícula

c: Velocidad de la luz

ze: Carga de la partícula

e: Carga del electrón

m_e : Masa en reposo del electrón

n: Densidad del blanco

I: Potencial de ionización medio del blanco

Se separan los interferentes que pasaron todos los filtros anteriores, por la diferencia entre su número de protones. En este caso, se cuenta con un sistema de elementos que mide propiedades físicas como la velocidad y el poder de frenado. Para separar estos dos isóbaros antes de llegar al detector e identificar claramente las cuentas de ^{10}Be y ^{10}B se hace uso de una ventana de Si_3Ni_4 en una proporción determinada, aprovechando que ^{10}B y ^{10}Be tienen un poder de frenado distinto. De esta forma se logra separar del haz el isóbaro interferente y llegan al detector de manera distinguible de tal manera que permite contar los núcleos para su posterior cálculo de concentración. (Gaitán, 2018) En AMS no se mide concentración absoluta, sino las cuentas del cociente isotópico entre el isótopo raro y el isótopo estable, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ en nuestro caso. Las muestras se comparan con estándares de cociente isotópico conocido. Todas las medidas incluyen blancos de laboratorio, que contienen el isótopo estable y estándares. Es posible determinar concentraciones tan bajas como 10^{-15} . (Solís Rosales & Martínez Carrillo, 2013)

3.5 Medición de ^{10}Be en AMS

Existen muchas otras técnicas dedicadas a la determinación de bajas concentraciones de diferentes analitos, como ejemplo de algunas de ellas podemos mencionar: fluorescencia de rayos X, espectroscopia de emisión con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) y activación neutrónica. Sin embargo, todas ellas poseen sensibilidades que no son suficientes cuando se trata de muestras con relaciones isotópicas del orden de 10^{-11} o menores. Otras técnicas, dedicadas a contar decaimientos radiactivos con muchísima sensibilidad, por ejemplo, métodos de centelleo líquido de bajo fondo, espectrometría alfa o gamma, tampoco son útiles en nuestro caso de interés, ya que debido al bajo número de núcleos presentes en las muestras y su larga vida media, las actividades específicas resultan ser extremadamente bajas. Es en este punto donde la técnica analítica de Espectrometría de Masas con Aceleradores se vuelve imprescindible y más sensible, ya que es capaz de identificar y contar los átomos en forma individual con relaciones isotópicas muy bajas utilizando los elementos ópticos del acelerador sin necesidad de esperar a que decaigan. (Gaitán, 2018)

La movilidad del ^{10}Be al material terrígeno y por ende a la fracción PM_{10} del material particulado es bien conocida. (Padilla S. , 2015) Sin embargo, se conoce muy poco de la movilidad de este elemento a partículas de diámetros más pequeños como las menores que $2.5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$). A diferencia del PM_{10} , que contiene una fracción importante de polvo mineral y compuestos terrígenos resuspendidos, el material particulado de la fracción $\text{PM}_{2.5}$ se forma mediante procesos de combustión y conversión de gas a partícula a través de un proceso de condensación química casi instantánea. Esto tiene como resultado una menor proporción de polvos resuspendidos que contienen ^{10}Be . Es por eso que el ^{10}Be contenido en $\text{PM}_{2.5}$ podría considerarse como una medida independiente y directa del ^{10}Be meteórico.

La fracción $\text{PM}_{2.5}$ está constituida no solamente por compuestos carbonosos; también contiene compuestos sulfurados y nitrogenados como SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ . Es importante resaltar este detalle porque las variaciones

en la concentración de sulfatos se correlacionan con la determinación de ^{10}Be , por la marcada afinidad de este elemento por el sulfato y la tendencia a acumularse más en la fracción $\text{PM}_{2.5}$ que en la PM_{10} . Las concentraciones de azufre atmosférico en zonas metropolitanas pueden aumentar por actividad volcánica o industrial, (Raga, 1999) o como en el caso de la ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México), por la presencia de una fuente importante de dióxido de azufre y sulfatos proveniente del corredor industrial Tula-Tepeji. (Moya, 2003)

Las corrientes obtenidas para el ion atómico de ^{10}Be son extremadamente bajas, por ello se recurre a la extracción de uno de sus iones moleculares, el $^{10}\text{BeO}^-$, con corrientes mucho más altas; la muestra se prensa en el cátodo en forma de óxido. La desventaja de este método radica en la existencia de moléculas de $^{10}\text{BO}^-$ durante la extracción que, en este caso, como el ^{10}B es más abundante en el ambiente que el ^{10}Be , supone un serio interferente que impide identificar de manera independiente las cuentas de ^{10}Be en el detector final. (Ruiz, 2012)

3.5.1 Sintonización

La sintonización de haces de partículas estables y abundantes, se realiza habitualmente con instrumentos de diagnóstico del haz con que cuenta el acelerador, estos son: monitores de perfil del haz (BPM, Beam profile monitor por sus siglas en inglés) y cajas de Faraday (FC, Faraday Cups por sus siglas en inglés). Estos dispositivos permiten conocer el perfil del haz y medir su corriente, respectivamente. Dependiendo de la partícula que se requiere sintonizar, puede considerarse el uso de un anión molecular para su extracción desde la fuente de iones del acelerador. En LEMA, con la sintonización para la medición de ^{10}Be , al extraerlo de la fuente de iones como BeO^- se obtiene aproximadamente 50 veces más corriente que cuando se extrae el ion atómico. Para sintonizar el sistema para la medida de ^{10}Be , no es posible emplear directamente el haz de ^{10}Be , ya que la intensidad del haz se encuentra por debajo del nivel de sensibilidad de los dispositivos FC o BPM que se encuentra en la entrada del deflector electrostático (ESA) en la zona de alta energía (Padilla S. , 2015). El método empleado habitualmente para sintonizar el sistema consiste en emplear primero un haz del isótopo

estable ^9Be , más abundante que el ^{10}Be , más fácil de detectar y por dos razones fundamentales: porque se adiciona a la muestra (portador, su abundancia es escasa en la naturaleza pero es mayor que la del ^{10}Be y permite realizar la radioquímica en el estudio) para obtener corrientes medibles en las FC, poder hacer un seguimiento del mismo, y por la proximidad de su masa a la del isótopo problema ^{10}Be , lo que le permite tener un comportamiento muy similar a éste ante todos los elementos del sistema y en especial durante el proceso de *stripping*, para ello se debe modificar adecuadamente el campo del imán inyector y la tensión del terminal para sintonizar el radionucleido de interés. Este procedimiento se realiza manteniendo la rigidez magnética constante y modificando en forma apropiada los parámetros del acelerador para que los iones de ^{10}Be se desvíen correctamente en el imán analizador (*bouncing*). La frecuencia del *bouncing* debe ser alta para eliminar la influencia de las inestabilidades del sistema en la medida del cociente isotópico. Este proceso ocurre en el deflector de baja energía (Padilla S., 2015) Para conseguir que sea el ^{10}Be y no el ^9Be ya sintonizado quien satisfaga la condición impuesta por el imán analizador, se modifica la energía de las partículas para que compensen con energía el cambio en la masa y mantengan constante la rigidez magnética. Además, para sintonizar a baja energía moléculas de masa 26 (molécula de ^{10}BeO) se debe ajustar el campo magnético del imán inyector. Una correcta sintonización del ^{10}Be implica una correcta sintonización de su isóbaro estable ^{10}B , ya que al poseer la misma masa, resultan indistinguibles para los elementos de selección y transporte del acelerador, es por esta razón que pasa todos los filtros hasta el absorbente pasivo que los separa por su poder de frenado (Ruiz, 2012).

3.6 Aerosoles

Consiste en una mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso, cuyo tamaño va desde $0.002\ \mu\text{m}$ (algunas moléculas) hasta $100\ \mu\text{m}$, esto significa que pueden permanecer en suspensión por un tiempo de al menos 1 hora, algunos autores incluyen la condición de que deben ser capaces de observarse o medirse. (Brook, 1997) En la práctica el término aerosol usualmente se refiere a los componentes

semivolátiles y no volátiles que forman parte de las partículas, pero no a los compuestos volátiles que residen exclusivamente en la fase gaseosa (Moya, 2003).

Los aerosoles se producen de manera natural (cenizas volcánicas, tormentas de polvo, erosión del suelo, incendios forestales, pulverización del agua marina, estos últimos aerosoles llegan al mar cerca de donde fueron emitidos) y de forma antropogénica (quema de combustibles en motores térmicos para el transporte y centrales termoeléctricas para la generación de la energía eléctrica, alteración de la superficie terrestre) en los países más desarrollados o muy urbanizados como la Ciudad de México. Presentan una alta variabilidad espacial y temporal en la atmósfera con lo que su estudio es muy importante para conocer los efectos que producen sobre el clima. Tienen un impacto directo en el balance radiativo de la Tierra dispersando y absorbiendo la radiación solar y sus efectos radiativos se clasifican en directos (efectos en la propagación de la radiación), indirectos (modificación de los efectos radiativos de las nubes) y semidirectos (efecto de la absorción de los aerosoles en una nube) (Raga, 1999).

Las partículas en un aerosol se distinguen de las pequeñas moléculas de un gas por su habilidad de causar dispersión incoherente de la luz visible y por tanto por interferir en su transmisión; como consecuencia, la presencia de altas concentraciones de aerosoles es indicada por la neblina atmosférica. Para que las partículas puedan dispersar la luz visible, deben de tener dimensiones aproximadas a las longitudes de onda de la misma cuando menos en un orden de magnitud al menos un décimo de 400 nm (límite de la luz visible, es decir, 0.04 μm).

Las partículas no son esféricas ni todas de igual densidad, sino que responden a un alto grado de variabilidad de tamaño y de anisotropía en todas sus demás propiedades físicas; para fines práctico-comparativos se les asigna un diámetro equivalente, que corresponde al diámetro que tendría la partícula esférica con el mismo volumen que la partícula en estudio, además y más importante aún es el diámetro aerodinámico equivalente (SUÁREZ, 2012) (Wagner & Stellino, 1996), que depende de la densidad de la

partícula y se define como el diámetro de una partícula esférica de densidad igual a 1 g/cm³ que tendría los mismos efectos gravitatorios y velocidad en la atmósfera que la partícula en cuestión. Esta última definición es fundamental para la interpretación de resultados ambientales. Cuando el diámetro aerodinámico de la partícula es menor que 0,5 µm, se utiliza el diámetro de difusión de la partícula en lugar del diámetro aerodinámico, el cual corresponde al diámetro de una esfera con el mismo coeficiente de difusión que el de la partícula, bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa (Marino, 2011).

La distribución de las partículas en los aerosoles es la resultante de la sumatoria de todas las distribuciones de tamaño producidas por fuentes individuales y transformaciones secundarias. Además, se conforma de etapas resultantes de la pérdida o transformación másica del conjunto: aglomeración, volatilización, reacciones gas-partícula y afectación del sistema por humedad y lluvia. Las composiciones químicas de las diversas modas de las distribuciones de tamaño de los aerosoles son más complejas, y las estrategias de muestreo deben considerar rangos específicos de tamaños para posteriores análisis químicos representativos. El carácter cambiante de la atmósfera dificulta todavía más los lineamientos a seguir para un buen muestreo. (Hong Zhuang, 1999)

3.6.1 Material particulado 2.5 µm

En términos de calidad del aire, se definen también cuatro parámetros fundamentales, atendiendo al tamaño de corte de los sistemas de captación: TSP (del inglés *Total Suspended Particles*) comprende partículas menores que 100 µm; PM₁₀, fracción inhalable, incluye partículas menores que 10 µm; PM_{2.5}, fracción respirable y PM₁ (PM, *Particulated Matter*, por sus siglas en inglés). La primera mencionada, se refiere a partículas totales en suspensión. Las PM se definen como la masa del material particulado que atraviesa un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10 µm, 2.5 µm y 1 µm, con una eficiencia de corte del 50 %. Las partículas se transportan dependiendo de los movimientos del aire en la atmósfera, provocando su interacción y cambios en su diámetro, permitiendo este fenómeno su clasificación como finas (partículas <2.5 µm), se aglomeran fácilmente y van creciendo en presencia de humedad,

formando partículas ultra finas ($\leq 0.1 \mu\text{m}$, tienen muy corto período de vida); acumulables (coagulan rápidamente por el sistema multifásico y se transforman en conglomerados) y gruesas (2.5- 10.0) μm en este rango incluyen iones inorgánicos (sulfatos, nitratos, metales, carbón combustible, etc.), aerosoles orgánicos y otros productos de combustión. (Arrieta-Fuentes, 2016)

En general, las partículas que causan problemas significativos de contaminación del aire y a la salud tienen diámetros de (0.01 a 10) μm , los cuales son tamaños mucho menores que la arena más fina de entre 20 μm y 2000 μm e incluso el diámetro de un cabello humano (de hasta 75 μm). Es importante destacar que cuando entran en contacto físico directo dos partículas finas, se adhieren entre sí por la acción de las fuerzas de enlace, electrostáticas y las de Van der Waals, las cuales son proporcionales al área superficial de la partícula, por lo que la mayor parte de ellas son lo suficientemente grandes como para que la gravedad o la inercia superen dichas fuerzas. Mientras menor es el tamaño de la partícula, el cociente de estas fuerzas con la inercia y la gravedad es mayor. Por lo anterior expuesto, el estudio del control de la contaminación por material particulado consista en aglomerar las partículas para que puedan ser colectadas más fácilmente. (Luis C. Angulo, 2011)

3.6.1.1 Distribuciones de tamaño de los aerosoles

El tamaño es una propiedad importante a conocer de los aerosoles, ya que brinda información sobre los fenómenos de dispersión de la luz, en la visibilidad y en el balance de energía radiativa global. Igualmente, este parámetro es indicativo de los tiempos de residencia de las partículas en la atmósfera. El tamaño también determina el nivel y zonas de depósito químico de los aerosoles en el sistema respiratorio de los seres vivos. La distribución y representación del tamaño de partículas, se realiza de acuerdo a su diámetro y número de partículas. Se identifican en zonas continentales promedio, cuatro modas en la distribución de tamaños: nucleación, Aitken, acumulativa y gruesa. La primera y más pequeña incluye partículas menores que 0.02 μm ; la Aitken incluye partículas con diámetro entre (0.02 y 0.1) μm ; la acumulativa comprende partículas de

(0.1 a 1) μm ; sin embargo, las partículas finas son las comprendidas entre estas dos modas; la moda gruesa contiene partículas mayores que (1 a 10) μm . (Miranda, 2004)

En la moda de nucleación, la mayor concentración en número de partícula se encuentra entre (5-15) nm. Son atribuidas a precursores como H_2SO_4 , NH_3 y vapor de agua. La vida media de estas partículas en la atmósfera es del orden de horas ya que coagulan rápidamente con otras partículas o incrementan de tamaño por condensación. La nucleación se ve favorecida por descensos en la temperatura y/o incrementos en la humedad relativa.

La moda Aitken contiene partículas con origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de partículas del moda nucleación). Es probable que las de origen secundario se formen por procesos de coagulación a partir del modo de nucleación, por condensación y/o por reacciones en fase líquida (con compuestos inorgánicos). La influencia de las emisiones antropogénicas en estas partículas requiere estudios de mayor profundidad, debido a que los reportes no esclarecen este fenómeno. (Marino, 2011)

La moda de acumulación se forma a partir del crecimiento de las partículas de la moda Aitken, por medio de reacciones en fase líquida que tiene lugar en gotas de agua en las nubes. La transferencia de masa es máxima en la nube a pesar del escaso tiempo de reacción, debido al elevado volumen de agua y la velocidad de reacción en las nubes. Aproximadamente el 90% del sulfato que se forma en la atmósfera es originado por la oxidación en fase líquida del dióxido de azufre en las nubes. El tiempo de residencia en la atmósfera es máximo para estas partículas. (Vedal, 1997)

La moda gruesa contiene partículas que se forman por la erosión de la superficie terrestre, su crecimiento no va a depender de la coagulación de partículas de diámetro menor que 1 μm pertenecientes a modas anteriores. Además, las partículas primarias generadas por procesos mecánicos, tampoco darán lugar a la formación de partículas con tamaño mayor que 1 μm , por limitaciones energéticas. Las partículas de la moda

acumulativa no aumentan de volumen e ingresan en la moda gruesa, debido a que su concentración es muy baja para que su coagulación sea efectiva. Por este motivo la migración entre modas de las partículas con diámetro menor que $1 \mu\text{m}$ no se va a dar con esta moda. (Powell, 2014)

Estas partículas se remueven de la atmósfera dependiendo de la moda a la que pertenecen, los de Aitken se condensan en partículas de mayor tamaño para posteriormente transigir una coalescencia en cadenas de agregados, siendo finalmente eliminados por precipitación en el agua de lluvia. Las partículas de acumulación forman gotas que se eliminan de manera parecida, pero menos eficaz y las partículas gruesas se eliminan por acción gravitatoria, es decir, por sedimentación. El tiempo de residencia en la atmósfera se comporta de manera inversa al diámetro de la partícula, ya que se van a coagular rápidamente y pasar a la siguiente moda. En la siguiente **Figura 8** se muestran las distribuciones modales de tamaño de partículas según. (Rodríguez, Querol, Alastuey, Kallos, & Kakaliagou, 2001)

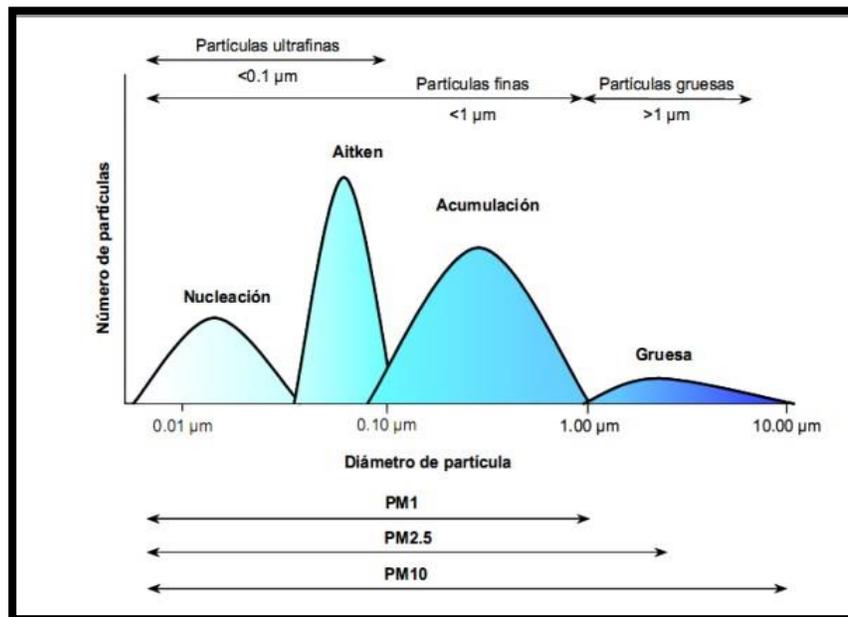


FIGURA 7: Distribución de modos de tamaño de partícula. (Marino, 2011)

Para aerosoles urbanos, son comparables en volumen las modas acumulativa y gruesa; y, aunque es pequeña en volumen, la moda nuclear domina en la distribución de aerosoles urbanos. Las partículas de la moda nuclear pueden ser transferidas a la moda acumulativa mediante la coagulación. La coalescencia de las nubes y las transformaciones en las gotas de las nubes, seguidas de la evaporación, son procesos importantes en la formación de aerosoles pertenecientes a la moda acumulativa. Las partículas de la moda nuclear se remueven de las superficies por difusión, y tienen largos tiempos de residencia en la atmósfera (a veces de años), además de que penetran profundamente en los sistemas respiratorios de los seres vivos. Las finas son formadas por la nucleación con gases, mientras que las gruesas se forman mediante procesos mecánicos de partículas mayores o materiales gruesos. (Chow, 2002)

Se han realizado a través de los años mediciones ambientales de la masa y composición química de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con el fin de asociarlas con sus fuentes. Aproximadamente el 90% de la PM_{10} proveniente del material geológico mientras alrededor del 90% de $PM_{2.5}$ proviene de la combustión (Chow, 2002)

3.6.1.2 Fuentes de aerosoles

Los aerosoles primarios son partículas producidas por procesos como la quema de biomasa, de combustibles fósiles, polvos de minas, polvo de construcción, suelo re suspendido, emisiones de la vegetación, erupciones volcánicas y polvo cósmico. Los aerosoles secundarios son resultado de reacciones químicas o fotoquímicas. Las partículas gruesas con diámetros entre $2.5 \mu m$ y $10 \mu m$ (PM_{10}), se forman de manera natural o a través de la pulverización mecánica como resultado de actividades antropogénicas. Las partículas finas, con diámetros entre $0.1 \mu m$ y $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$), son el resultado de la coagulación de partículas del modo nuclear y la condensación de vapores en la superficie de partículas más pequeñas. La mayoría de las partículas mayores que $10 \mu m$ requieren fuertes corrientes de aire para mantenerse flotando en la atmósfera. Por otra parte, las partículas muy pequeñas tienden a unirse y coagular para formar mayores, lo que les limita su tiempo de residencia en el aire; además, las partículas con un rango de tamaños de (0.01-1)

μm son las que permanecen suspendidas por largos períodos que pueden ser a veces de años. (Hsu YM, 1995)

El material particulado carbonoso constituye hasta un 50% del $\text{PM}_{2.5}$, el cual se concentra en la atmósfera en la mañana. La Ciudad de México ocupa una superficie de 1485 km^2 a 2250 metros sobre el nivel del mar (msnm). La cuenca de México está bordeada por montañas de hasta 1000 m a ambos lados, menos en el norte. La ZMVM genera más del 30% de la producción económica de la nación y contiene aproximadamente el 20% de la población total, llegando a unos 20 millones de habitantes aproximadamente, con más de 3 millones de vehículos motorizados que viajan en las carreteras todos los días. La calidad del aire empeora principalmente en los meses secos de invierno, causando efectos adversos en la salud debido a las exposiciones a CO , O_3 y partículas suspendidas. (Raga, 1999)

3.6.2 Filtros

Para muestreo de alto volumen, generalmente se utiliza cualquiera de los siguientes tipos de medios filtrantes en dependencia de lo que se desee estudiar: (Nevers, 1998)

- Filtro de fibra de celulosa
- Filtro de fibra de vidrio o cuarzo
- Filtro de fibra mixta
- Filtro de membrana

Los siguientes son parámetros esenciales a considerar para escoger adecuadamente el filtro a utilizar:

- Eficiencia de muestreo de partículas: los filtros deben retener más del 99% de las partículas que se estime se encuentran en el aire, de acuerdo con su tamaño y flujo volumétrico
- Estabilidad mecánica: deben ser lo suficientemente fuertes para minimizar escurrimientos durante el muestreo y para soportar el manejo

- Estabilidad química: no deben reaccionar químicamente con las partículas atrapadas
- Estabilidad térmica: deben mantener su porosidad y estructura durante el muestreo a cualquier temperatura ambiente
- Corrección del blanco: no deben contener altas concentraciones de los analitos a determinar

Los filtros de cuarzo son los mejores para determinar la concentración de partículas en el aire ambiente, ya que tienen gran estabilidad de peso con respecto a la humedad (son menos higroscópicos), tienen alta eficiencia de colección y atrapan casi cualquier tamaño y geometría de partículas. (Padilla S. , 2015) Dependiendo del análisis, se requieren de otros tipos de filtros. Los filtros de fibra de silicio son usados cuando se requiere usar un filtro de fibra mineral (por su fácil extracción posterior por agentes químicos). Los de fibra de celulosa se usan cuando es conveniente que, en el análisis, el filtro sea destruido por ignición o digestión química, pues producen pocas cenizas. Sin embargo, tienen la desventaja de que presentan mayor resistencia al flujo que uno de fibra de vidrio. (Padilla S. , 2015)

Algunas características que debe presentar un filtro para monitoreos ambientales son las siguientes:

- No higroscópico.
- Un tamaño aproximado de 8"X10"
- pH de 6-10.
- Un peso máximo integral de 2.4 g.
- Área expuesta: 406.5 cm²
- Material: fibra de vidrio u otro material inerte no higroscópico, en nuestro caso, cuarzo
- Pérdida máxima de material del filtro: 2.4 mg
- Resistencia a la tensión: 500 g para una tira de 2 cm de ancho

Además de cumplir con todo lo anterior, se requiere tener mucho cuidado al elegir el filtro antes del muestreo. (Powell, 2014) (FRIEDLANDER, 1994)

3.7 Optimización de corriente con muestras blanco

Este tipo de estudio ayuda a identificar defectos en el procesamiento de las muestras; el prensado, que no siempre es uniforme en los cátodos y al incidir el haz de Cs en la erosión iónica se puede perder muestra. Con esta optimización se identifican datos atípicos en la medición, por eso es muy importante el número de réplicas de las muestras a procesar, ya que permite identificar irregularidades del acelerador durante la medición, como aparición de chispas o saltos. La evaluación de interés fue la lectura de las medidas de las corrientes asociadas a los isótopos estables en la copa de Faraday (FC, por sus siglas en inglés) que se encuentra a la salida del deflector magnético de alta energía (FC4) del AMS LEMA **Figura 9**, y se graficaron contra 1 hora correspondiente al tiempo de medición en el acelerador. Era de principal interés determinar el número de partículas que alcanzarán la FC con respecto al tiempo de medición (60 min). (Padilla S. , 2015)

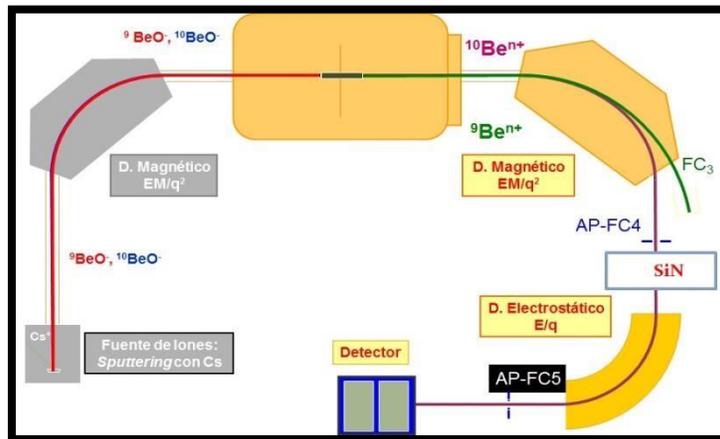


FIGURA 8: Esquema de trayectoria del 10Be en AMS LEMA (Padilla S. , 2016)

Se han efectuado diversas medidas de muestras blanco y patrones con el objetivo de determinar el fondo instrumental, la transmisión del ^{10}Be a lo largo del sistema y su separación del ^{10}B . Al introducir el cátodo de muestra en la fuente y ser bombardeados con Cs, salen varios fragmentos con igual masa que el de interés $^9\text{Be}^{16}\text{OH}^-$, $^9\text{Be}^{17}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{14}\text{N}^-$, $^{13}\text{C}^{2-}$ y $^{10}\text{B}^{16}\text{O}^-$. (Padilla S. , 2015)

Para determinar concentraciones de isótopos cosmogénicos en muestras naturales es muy importante la obtención de la máxima corriente de la fuente de iones y su estabilidad. Las corrientes altas implican mayor cantidad de iones extraídos y mejor estadística de recuento. La estabilidad de la corriente puede influir en el valor del cociente isotópico medido. Para ello se llevaron a cabo diversos ensayos con el fin de observar el comportamiento y evolución de la corriente de haz en la zona de alta energía, en blancos de ^9BeO , con respecto al tiempo de medición (60 min) para simular la corriente de una muestra real en el sistema. El trazador se utilizó en el proceso radioquímico como portador y blanco. Este estudio se realizó con el fin de elaborar y establecer un procedimiento a seguir en futuras mediciones. Este proceso de optimización se debe realizar regularmente para calibrar los parámetros del equipo con el ^9Be y para conocer y optimizar la trayectoria que tendrá el ^{10}Be antes de llegar al detector.

3.8 Caracterización del MRC NIST 1648a

1648a es un material de referencia certificado por el *NIST* (National Institute of Standards and Technology), por sus siglas en inglés, particulado atmosférico recolectado en un área urbana. Está destinado para ser material de control de calidad; realizar evaluaciones de los métodos utilizados en análisis inorgánicos y para determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Los valores certificados se basan en el acuerdo de los resultados de dos o más técnicas analíticas químicamente independientes obtenidas en el *NIST* y en laboratorios expertos colaboradores. Un valor certificado por el *NIST* es un valor en el cual se tiene mayor confianza en su exactitud, ya que todas las fuentes de sesgo conocidas o sospechosas se han investigado o se han tomado en cuenta. La fecha de caducidad de este estándar es el 1 de octubre de 2027 si se establecen

las medidas de manejo y almacenamiento indicadas por el fabricante. En los valores de fracciones másicas de los elementos químicos que lo conforman no sale señalado el ^{10}Be por lo que fue nuestro interés determinar qué concentración contenía el estándar, ya que se trataba de un material particulado con importantes proporciones de $\text{PM}_{2.5}$. (González & Watters, 2011)

Se realizó una metodología a partir de una determinación anterior de concentraciones de ^{10}Be en el MRC siguiendo la metodología, realizada en LEMA a partir de la literatura y las modificaciones realizadas en (Padilla S. , 2015), pero con ligeras transformaciones. Debido a que durante el pre tratamiento de la muestra se pierde un importante porcentaje de ^{10}Be escalonadamente, este estudio se realizó con el objetivo de elevar el rendimiento químico ^{10}Be que se obtiene en AMS, así como comprobar si es posible detectar ^{10}Be en material particulado $\text{PM}_{2.5}$ por encima del límite de detección y cuantificación del equipo. Se realizó, como parte de la caracterización del *NIST 1648a* llevada a cabo por más investigadores de LEMA. Estas modificaciones a la metodología se realizaron para determinar cómo se adhiere el ^{10}Be al material particulado urbano de tamaño menor o igual a 2.5 micrómetros, debido a que al ser más pequeño el tamaño de muestra, hay menor proporción de material resuspendido haciendo esta metodología más directa e independiente para medir concentraciones de ^{10}Be . Este estudio se hace por primera vez y se busca validar la metodología empleada. En la presente tesis, se incluye la primera parte de esta validación que es la robustez y, repetibilidad y reproducibilidad del método. Este trabajo conjunto se presentó en el Simposio Internacional de Física de radiaciones 2019 (González & Watters, 2011).

3.9 Tamaño de partícula

Cuando las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ son superiores a $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se considera perjudicial para la calidad del aire. Las distribuciones de tamaño de partícula en MRC *1648a* se determinaron en suspensión acuosa mediante instrumentación de dispersión de luz láser. Los métodos ópticos se han utilizado en forma creciente desde hace años para la medida de las distribuciones de los tamaños de partícula. En la actualidad, es la

tecnología láser la que ha alcanzado su gran protagonismo, ya que es capaz de proporcionar resultados con rapidez, precisión y reproducibilidad, por lo que en el momento presente se sitúa como un método alternativo a los ya existentes. (Harris, 1991)

El principio físico de un analizador de difracción es bien conocido desde hace muchos años. J. Fraunhofer describió en 1817 un sistema para producir figuras de difracción, cuya diferencia con los métodos actuales empleados, se basa sólo en el foco luminoso. Al hacer pasar un rayo láser monocromático expandido a través de una muestra pulverizada, en seco o en suspensión en un líquido no reactivo, la luz se difracta y se produce una figura de difracción de simetría radial en el plano focal de la lente. Si todas las partículas iluminadas son de tamaño único, el rayo láser formará una figura de difracción, cuya energía de distribución sigue la Ley de Airy. La intensidad luminosa de los anillos claros es directamente proporcional al número de partículas vistas con el haz luminoso, y los radios de los anillos son inversamente proporcionales al diámetro de las partículas. Cuando las partículas tienen tamaños diferentes, la figura de difracción obtenida se basa en una superposición de imágenes de Airy, cada una de las cuales corresponde a un diámetro diferente de partícula, y cuya intensidad disminuye con la distancia al centro. Durante las últimas dos décadas, la difracción láser ha reemplazado los métodos convencionales, como el tamizado y la sedimentación, para medir partículas más pequeñas que unos pocos milímetros, y ha reemplazado al microscopio óptico y de electrones para las partículas más grandes ($> 50 \mu\text{m}$). ((UCAR), 2015)

Este método reconocido y cubierto por la ISO 2009 permite detectar el tamaño de materiales de diámetro entre (nm-mm) descrito por tamaño de esfera equivalente a volumen en menos de 1 min de medición. Es un método absoluto que no requiere calibración. Las partículas dispersan la luz y generan patrones de dispersión angular únicos. La difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Las partículas grandes dispersan la luz en ángulos pequeños en relación con el rayo láser, y las partículas pequeñas dispersan la luz en ángulos grandes. Luego se analizan los datos de la intensidad de

dispersión angular para calcular el tamaño de las partículas responsables de crear el patrón de dispersión, utilizando la teoría Mie de la dispersión de luz para calcular la distribución de tamaño de partícula, suponiendo un modelo de esfera equivalente al volumen. La teoría Mie requiere que se conozcan las propiedades ópticas (índice de refracción y componente imaginario) de la muestra que se está midiendo, junto con el índice de refracción del dispersante. Por lo general, las propiedades ópticas del dispersante son relativamente fáciles de encontrar a partir de los datos publicados, y muchos instrumentos modernos cuentan con bases de datos integradas que incluyen dispersantes comunes. (Naturales, 2011)

Las suspensiones se prepararon mediante una sonicación de 10 min en agua destilada, se introdujeron gradualmente en la pequeña muestra llena de agua. La medición se realizó hasta lograr un 6.5 % de oscurecimiento del rayo láser. Cada suspensión se midió tres veces durante 30 s con una pausa de 10 s entre las pasadas. Índice de refracción de 1.52 y un índice de absorción de 0.1 se escogieron para las medidas. Las incertidumbres en estos valores se estiman en $\pm 10\%$ relativo (2s) dos desviaciones estándar. (González & Watters, 2011)

Para la presente tesis se determinarán concentraciones de ^{10}Be asociadas a filtros de aerosoles selectivos a material particulado 2.5 μm . En trabajos recientes se comprobó que el ^{10}Be se adhiere muy bien a los aerosoles de diámetro 10 micrómetros (Gaitán, 2018) y se desea comprobar qué tanto se adsorbe en partículas con diámetros más pequeños y más perjudiciales para la calidad del aire en altas concentraciones. Para ello se determinó el ^{10}Be en el MRC NIST 1648 a, ya que no se encontraba reportado y su determinación serviría como referencia de concentraciones de ^{10}Be en las medidas de AMS en muestras de aerosoles urbanos. Basado en la información complementaria del certificado de calidad del material de referencia, los resultados del tamaño de partícula dieron indicación de que las partículas con diámetros menores que 1.35 μm se encontraban ubicadas en el percentil 10; las partículas con diámetro menor que 5.85 μm correspondían al percentil 50 y que solo partículas con diámetro mayor que 30.1 μm constituían el 10% de este material de referencia particulado (González & Watters, 2011). Esto es, que el material particulado de diámetro 2.5 μm

se encuentra entre el percentil 50, es decir, que aproximadamente el 50% de este material tiene tamaño de partículas pequeño por lo que puede servir como una matriz de referencia de determinación de concentraciones de ^{10}Be en material particulado urbano. En la presente tesis se realiza una modificación de la metodología para obtener ^{10}Be a partir de material particulado urbano certificado, esto es parte de una caracterización del material de referencia *NIST 1648a*, encabezado por la doctora Méndez García y colaboradores desde 2017 en LEMA.

Las partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) tienen una alta probabilidad de depositarse en el alveolo de los pulmones y se asocian con un mayor riesgo a la salud que las partículas grandes. Partículas de este tamaño también tienen un tiempo de permanencia en la troposfera de días a semanas, y pueden desplazarse a distancias de miles de kilómetros, dispersándose ampliamente. (Wagner & Stellino, 1996)

4 METODOLOGÍA

4.1 Optimización de corriente con muestras blanco

Se prepararon tres blancos, que se refieren a la única adición del trazador sin pasar por la separación cromatográfica de las resinas de intercambio iónico. Se denotaron con las siglas BkBe_{1,2,3}.

4.1.1 BkBe

Se adicionaron 250 µL de trazador ⁹Be₄O (C₂H₃O₂)₆ en HNO₃ 2 %-3 % de 1000 ppm a 5 mL de agua y 3 gotas de HNO₃ suprapur 65 %. Se adicionaron gotas de NH₄OH hasta llegar a pH entre 9 y 10, ya que el BeOH₂ precipita a pH básico entre estos valores, este paso es muy importante, ya que es un indicativo visual de la presencia de Be en la muestra; posteriormente se adicionó 1 mg (100µL) de estándar de hierro Fe (NO₃)₃ en HNO₃ 10 % de 10 000 ppm para acomplejar el Be (OH)₂, inmediatamente se observa el precipitado color naranja. Se centrifuga a 4500 rpm por 10 min; se decanta el sobrenadante, se añaden 3 mL de agua y se centrifuga nuevamente a 4 500 rpm por 5 min. Una vez decantado nuevamente el sobrenadante, las muestras se liofilizan por 24 h; seguidamente se calcinan en mufla a 1000 °C por 1 h para obtener BeO; se homogenizan con 4 mg de Nb y se prensan con pin de cobre para ser analizadas en el AMS.

Se denota como A al eluido que solo pasó por la primera resina de intercambio iónico, como AB a la muestra que pasó por la primera y segunda resina de separación cromatográfica y ABC a la muestra que pasó por las tres resinas de intercambio iónico y purificación de berilio.

4.1.2 BeA_{1,2,3}

Se añaden 250 µL de trazador de ⁹Be₄O (C₂H₃O₂)₆ en HNO₃ 2 % -3 % de 1000 ppm a un vaso de Teflón con 3 mL de HCl 9 M; y se seca en placa calefactora. Este paso se repite tres veces para eliminar el HNO₃ que contiene el trazador, evitando así un mal funcionamiento de la resina catiónica en forma de cloruro que retiene

hierro; así como para acondicionar la muestra a la molaridad de funcionamiento de la resina (9 M). Una vez que la muestra se ha evaporado tres veces, se añaden 3 mL de HCl 9 M para ser pasados por la resina catiónica previamente acondicionada. El eluido obtenido se evapora a sequedad en la placa calefactora; se le añaden tres gotas de HNO₃ suprapur y 3 mL de agua. Se deja reposar unas horas para posteriormente ser coprecipitado con estándar de Fe (NO₃)₃ en HNO₃ 10 % de 10 000 ppm a pH entre 9-10; ser centrifugado; liofilizado; calcinado a 1000 °C por 1 h; prensado con Nb y analizado por AMS.

4.1.3 **BeAB_{1,2,3}**

Se añaden 250 µL de trazador de ⁹Be₄O (C₂H₃O₂)₆ en HNO₃ 2 %-3 % de 1000 ppm a un vaso de Teflón con 3mL de HCl 9 M; se seca en placa calefactora tres veces, se añaden 3 mL de HCl 9 M para ser pasados por la resina catiónica. El eluido obtenido se evapora a sequedad en la placa calefactora. Se evapora tres veces con 3mL de HCl 1 M, esto es para acondicionar la muestra para separar el Aluminio en la resina aniónica en forma de H⁺. Una vez seca, se añaden 3 mL de HCl 1 M y se pasa la muestra por la resina intercambiadora. El eluido se calienta a sequedad en placa calefactora; se le añaden tres gotas de HNO₃ suprapur 65 % y 3mL de agua y se deja reposar unas horas o toda la noche para posteriormente ser coprecipitado con Fe a pH entre 9-10; ser centrifugado; liofilizado; calcinado a 1000 °C por 1 h y prensado con Nb para ser analizado por AMS.

4.1.4 **BeBE**

Se añaden 250 µL de trazador de ⁹Be₄O (C₂H₃O₂)₆ en HNO₃ 2% -3 % de 1000 ppm a un vaso de Teflón con 3 mL de HCl 9 M se seca en placa calefactora tres veces; se añaden 3 mL de HCl 9 M para ser pasados por la resina catiónica que retiene Fe. El eluido obtenido se evapora a sequedad en la placa calefactora; tres veces con 3 mL de HCl 1 M, se añaden 3 mL de HCl 1 M y se pasa la muestra por la resina intercambiadora de iones. Los eluidos se secan en placa calefactora; se adicionan 3 mL de agua y 3 gotas de HCl concentrado; se trasvasan a tubo de centrifuga y se adiciona agua hasta completar 10 mL, se lleva a pH=9-10, con la adición de gotas de NH₄OH y estándar de Fe para la coprecipitación del Be; se centrifuga a 4500 rpm por 10 min, se

decanta el sobrenadante; se recupera el precipitado con 2 mL de ácido oxálico 0.4 M y se pasa la muestra por la resina de purificación de berilio. Los eluidos se precipitan; centrifugan; liofilizan; calcinan; se prensan como se explicó anteriormente y se analizan con AMS.

4.2 Obtención de ^{10}Be presente en el MRC NIST 1648 a

Este estudio es parte de un estudio comparativo que se realizó entre los laboratorios LEMA de CDMX en México y CNA de Sevilla en España y se utilizaron procedimientos, para ratificar la reproducibilidad y repetibilidad de la metodología que hasta ahora se realizaba, de la misma forma, se realizó una variación en la misma para determinar las diferencias o pérdidas de material durante el procesamiento radioquímico. Se le realizaron modificaciones a la metodología hasta ahora seguida según (Gaitán, 2018) y (Padilla S. , 2015) para el tratamiento radioquímico de la muestra con el fin de comparar las concentraciones de ^{10}Be que se obtienen. Se procesaron cuatro alícuotas de estándar, 150 mg y un blanco haciendo un total de cinco muestras a analizar. Se añadió 250 μL de portador de ^9Be después de pesar y antes de calcinar en la mufla por 4 h a 600 $^{\circ}\text{C}$. Se procesaron las muestras hasta la segunda resina de intercambio iónico, es decir, se realizó la separación aniónica con la primera resina selectiva a iones de Cl^- y que retiene el Fe presente en las muestras para posteriormente pasar este eluido a la resina catiónica selectiva a iones H^+ . Se precipitaron los eluidos de ^{10}Be con el estándar ICP Fe $(\text{NO}_3)_3$ de 10000 mg/L como agente coprecipitante una vez que se alcanzó el pH 9-10 con adición de gotas de NH_4OH para obtenerse $^{10}\text{Be}(\text{OH})_2$; se centrifugaron y liofilizaron por 24 h. Se llevaron a óxidos por calcinación en mufla por 1 h a 1000 $^{\circ}\text{C}$; se homogenizó con Nb y se prensaron los cátodos para ser medidos en AMS. Se empleó cristalería de Teflón y se extremó la limpieza para evitar contaminaciones con ^{10}Be meteórico durante el procesamiento.

4.3 Determinación de ^{10}Be en filtros de aerosoles de la campaña UNAM (CU)

Se realizó una campaña de muestreo de aerosoles atmosféricos colectados en filtros de cuarzo para material particulado de 2.5 μm , que sirvieron de referencia para determinar la concentración de partículas ambientales en aire en la azotea del edificio Colisur ubicada en el Instituto de Física de la UNAM. El período de muestreo fue del 18 de febrero de 2015 a 30 de diciembre de 2015, durante dos temporadas lluviosa (T1) y de transición entre lluviosa y poco lluviosa (T2), con el objetivo de registrar un promedio aritmético anual. Cada monitoreo se realizó en un mismo muestreador, donde se iban colocando los filtros una vez terminaba el tiempo de colección.

4.4 Región de estudio

El Valle de México es una región geográfica que se localiza en el centro sur de los Estados Unidos Mexicanos, se ubica sobre los 19.20 grados de latitud norte y 99.05 grados de longitud oeste. Se considera al Valle de México como parte de una cuenca, la cual tiene una elevación promedio de 2 240 metros sobre el nivel medio del mar (msnm) y una superficie de 9 560 km^2 , esta superficie considera parte del Estado de México, el sur del Estado de Hidalgo, el sureste de Tlaxcala y casi la totalidad del Distrito Federal.

Ésta cuenca presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. También se encuentran prominencias topográficas aisladas como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec. El Valle se ubica en la región Lagos y Volcanes del Anáhuac de la provincia fisiográfica del Eje Neo volcánico. La cuenca está rodeada por las sierras de Monte Alto, Monte Bajo y Las Cruces, Pachuca, así como la Sierra Nevada y la serranía de Chichinautzin. La orografía del valle se halla dominada por los volcanes Popocatepetl e

Iztaccíhuatl. En el Valle de México se localiza la Ciudad de México, una de las más densamente pobladas de Latinoamérica.

El muestreador se colocó en la azotea del edificio Colisur, ubicado en el Instituto de Física de la UNAM. Este sitio se caracteriza por ser una zona residencial con tráfico medio y con la ubicación de industrias relativamente cerca y con la presencia de una reserva ecológica. La Figura 10 muestra el sitio de muestreo.

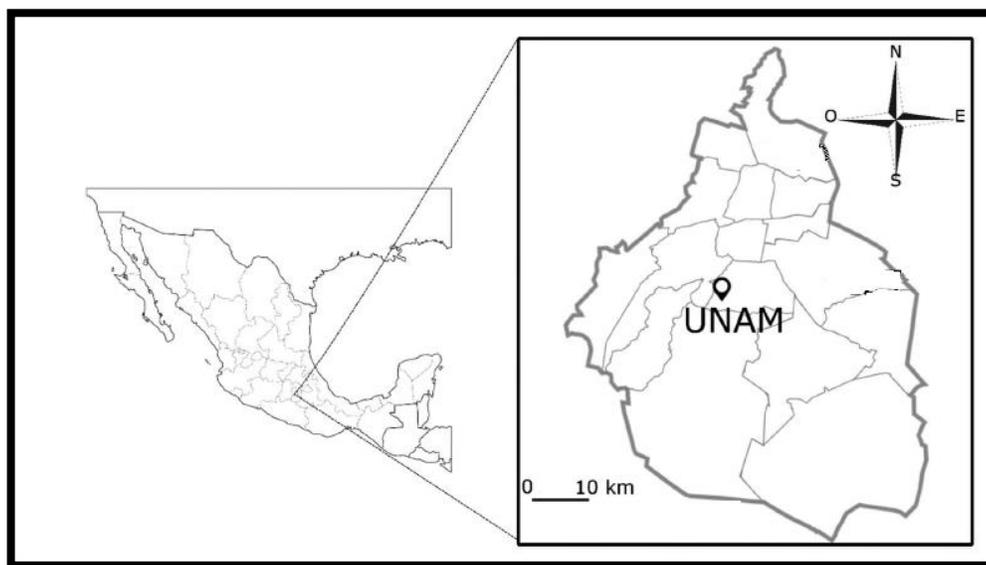


FIGURA 9: Sitio de muestreo. Campaña 2015 UNAM (CU). (Gómez, y otros, 2016)

4.5 Muestreador de alto volumen

La colecta de aerosoles se realizó en un muestreador de alto volumen (Graseby Andersen SA 2000-H, **Figura 11**), según la metodología de la Agencia Ambiental de Estados Unidos con un flujo de $1.9 \text{ m}^3/\text{min}$ durante 48 h. El área del filtro muestreado fue de 518.93 cm^2 , y el área de depósito fue de 427.90 cm^2 .



FIGURA 10: Muestreador de alto volumen

En el método de muestreo de alto volumen se succiona una cantidad determinada de aire ambiente a través de un filtro localizado en el interior de una caseta o coraza de concentración, en un período de muestreo de 48 h. El motor de succión debe ser capaz de funcionar por 48 horas continuas **Figura 12.**

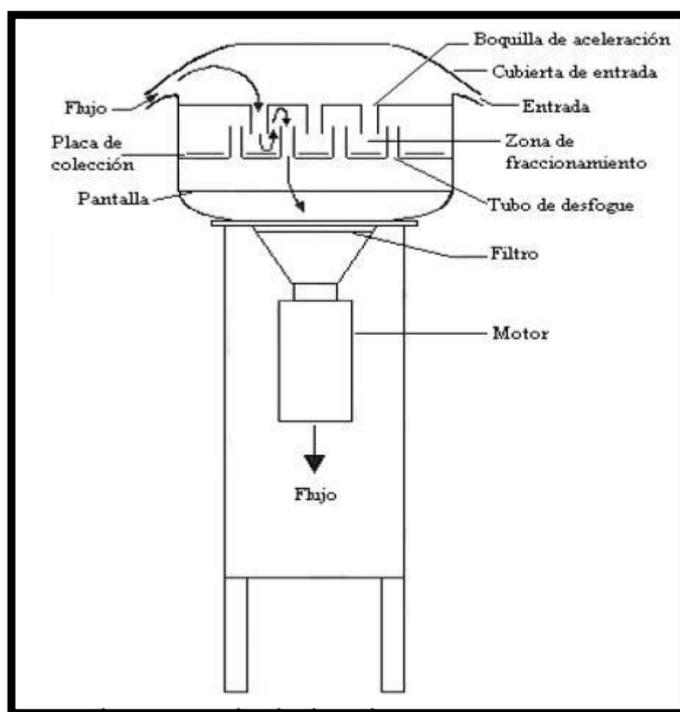


FIGURA 11: Esquema de funcionamiento del muestreador (REDAIRE. (Red de Vigilancia de la calidad del aire), 2012)

Después de que se coleccionan las muestras, los filtros retornan al laboratorio a sus condiciones originales siendo pesados de nuevo. Haciendo la diferencia entre el peso inicial y final, se calcula la masa total de material particulado recolectado.

Los filtros de cuarzo se acondicionaron y pesaron con temperatura y humedad constante y controlada en la estación de monitoreo atmosférico Vallejo, perteneciente a la Red Automática de monitoreo atmosférico (Aragón, 2018). Obteniendo un total de 29 filtros expuestos en toda la campaña (**Tabla 3**). Las muestras se analizaron en lotes de 8 y se procesaron 5 blancos junto a las muestras.

TABLA 3: Relación de filtros medidos en la campaña UNAM (CU)

TEMPORADA	# MUESTRA	# FILTRO	FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO
T1	1	36	18-Feb-15	20-Feb-15
	2	44	22-Feb-15	24-Feb-15
	3	43	24-Feb-15	26-Feb-15
	4	37	26-Feb-15	28-Feb-15
	5	71	25-Nov-15	27-Nov-15
	6	72	27-Nov-15	29-Nov-15
	7	73	29-Nov-15	01- Dic--15
	8	74	01- Dic--15	03- Dic--15
	9	75	03- Dic--15	05- Dic--15
	10	76	07- Dic--15	09- Dic-15
	11	77	09- Dic--15	10- Dic-15
	12	78	12- Dic--15	14- Dic--15
	13	79	14-Dic-15	16- Dic--15
T2	14	s/n	28-Feb-15	02-Mar-15
	15	41	04-Mar-15	06-Mar-15
	16	42	06-Mar-15	08-Mar-15
	17	46	11-Mar-15	13-Mar-15
	18	47	13-Mar-15	15-Mar-15
	19	48	15-Mar-15	17-Mar-15
	20	49	17-Mar-15	19-Mar-15
	21	50	19-Mar-15	21-Mar-15
	22	51	21-Mar-15	23-Mar-15
	23	60	12- Abr -15	14- Abr 15

24	61	14- Abr 15	16- Abr 15
25	62	16- Abr -15	18- Abr 15
26	63	18- Abr -15	20 Abr -15
27	64	20- Abr -15	22- Abr -15
28	65	22- Abr -15	24- Abr -15
29	66	24-Abr-15	26- Abr -15

4.6 Preparación de las muestras

La preparación radioquímica de la muestra es el proceso más importante entre el muestreo y la medición del cátodo de ^{10}BeO en el AMS, y, constituye el paso que puede arruinar o fomentar el estudio. Para llegar al cátodo se debe extraer el isótopo de la muestra natural, en este caso el filtro de aerosol, cuidando la limpieza para evitar interferencias. En este proceso, la muestra se destruye en su totalidad y debido a que el ^{10}Be se encuentra en trazas, se debe añadir una cantidad conocida de ^9Be (portador) que permitirá rastrear el isótopo de interés durante el proceso y hasta su detección en el acelerador.

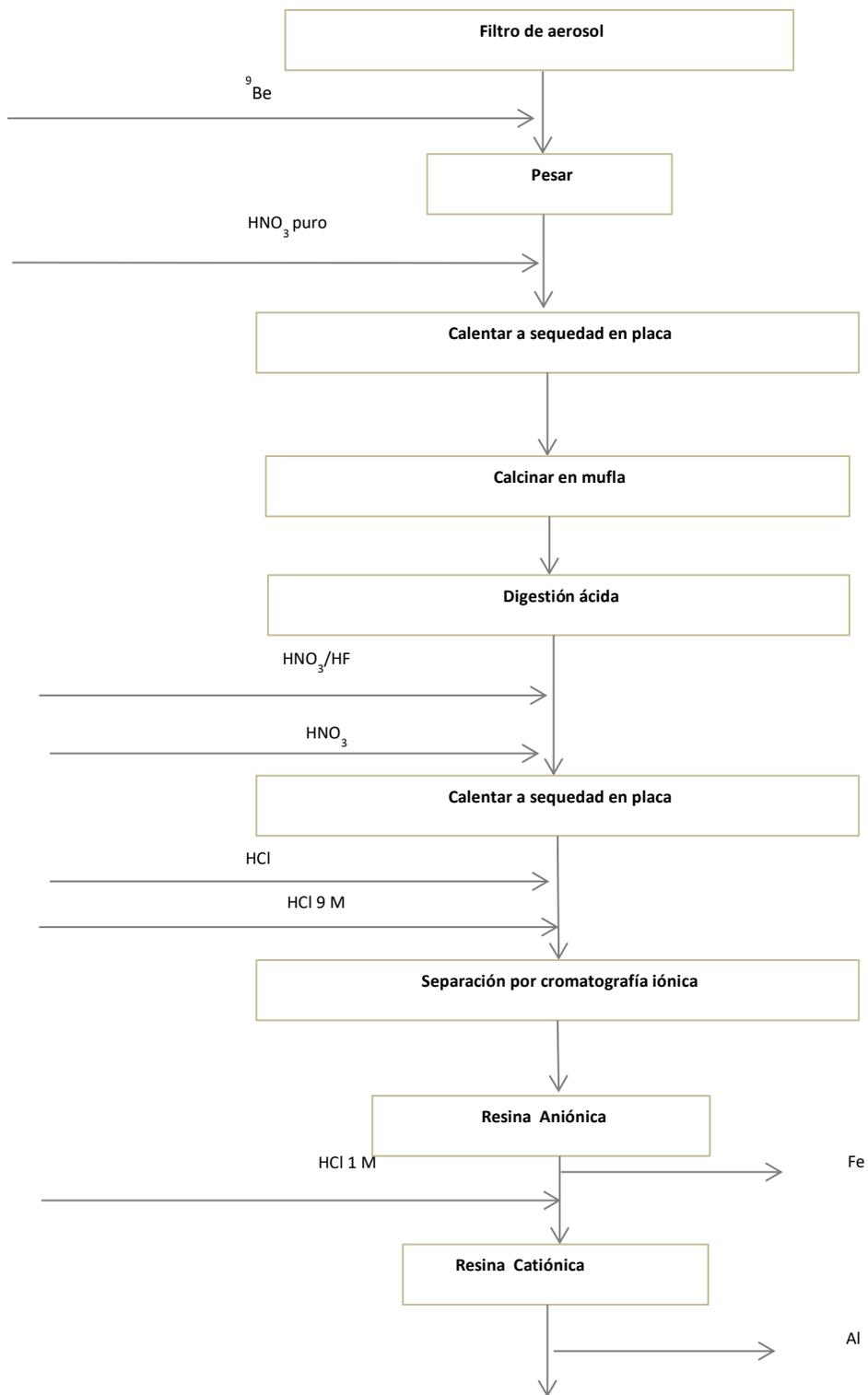
4.7 Procesamiento de los filtros

Para este procesamiento se sigue la metodología establecida por Padilla en 2015, con las modificaciones consideradas por el autor para determinar ^{10}Be en filtros de cuarzo. Los filtros se cortan en trozos y se pesan en balanza analítica antes y después de adicionar el portador de berilio. Inmediatamente después se les adiciona HNO_3 puro para que el portador añadido se homogenice con la muestra y se calienta en cápsula de porcelana a sequedad en placa calefactora. Una vez seca la muestra, se procede a la calcinación en mufla a $650\text{ }^\circ\text{C}$ por 4 h con el objetivo de eliminar la materia orgánica presente en la muestra. Después de la calcinación, se trasvasan las muestras a vasos de Teflón, donde se procede a la digestión ácida, añadiendo a la

muestra HNO_3 puro y HF hasta destruir el filtro. Una vez seco en la placa calefactora, se añade a la muestra HNO_3 puro y se lleva a sequedad varias veces. Este paso tiene como objeto redissolver el berilio, mantenerlo en solución y evaporar el fluoruro de silicio que se forma al añadir HF. Una vez llevada esta mezcla a sequedad se le adiciona HCl concentrado tres veces para acondicionar la muestra a ser separada en la siguiente etapa del proceso. Una vez seca la muestra se añade tres veces HCl 9 M y se deja enfriar y reposar.

Por otra parte, se comienza a acondicionar la primera resina de separación por intercambio iónico. Es una resina aniónica selectiva a iones de Fe presentes en la muestra, evitando su interferencia en los pasos posteriores del proceso radioquímico. Esta resina se acondiciona con H_2O y HCl a varias molaridades hasta alcanzar la concentración 9 M. En este punto, se hace pasar la muestra y se debe obtener un eluido traslúcido e incoloro. Los eluidos se llevan a sequedad en la placa calefactora y una vez secos, se procede a su acondicionamiento para la siguiente separación. A la muestra seca, se le añade HCl 1 M tres veces y se deja enfriar, al mismo tiempo se acondiciona la resina catiónica selectiva a iones de Al. En esta separación se eluye además el Al contenido en la muestra. Los eluidos de ^{10}Be obtenidos en este punto se llevan a sequedad en la placa calefactora. En este paso del procesamiento radioquímico, se debe comprobar que se esté separando ^{10}Be con éxito, por lo que se procede a su precipitación para el aseguramiento del correcto procesamiento de la muestra. Esta precipitación se realiza trasvasando la muestra del vaso de Teflón a un tubo de centrifuga y añadiendo varias gotas de NH_4OH hasta pH 9-10, se obtiene el precipitado. La muestra es centrifugada descartando el sobrenadante, separándolo así del precipitado. Mediante la visualización de un precipitado blanquecino, se verifica la correcta separación del radioisótopo de interés. Posteriormente se disuelve el precipitado en ácido oxálico 0.4 M para purificar el ^{10}Be de la presencia de Ca, se deja reposar unas horas para su posterior separación por resina selectiva a oxálico. En esta separación cromatográfica, la muestra queda atrapada en la resina y es posteriormente eluida con HNO_3 1 M. El eluido se lleva a sequedad en placa calefactora para seguidamente precipitarse ya purificado con NH_3 y estándar de Fe. Se centrifuga y se liofiliza durante 24 h. Hasta aquí se obtiene $^{10}\text{BeOH}$. Se debe proceder a la calcinación a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h,

para obtener la molécula de ^{10}BeO que se medirá en el acelerador. Posterior a la calcinación y antes de la medición en AMS se procede al prensado de la muestra, mezclando esta con Nb. Finalmente, se procede a la medición de la muestra en AMS. La **Figura 13** muestra con más detalle en forma de diagrama el procedimiento que se acaba de explicar.



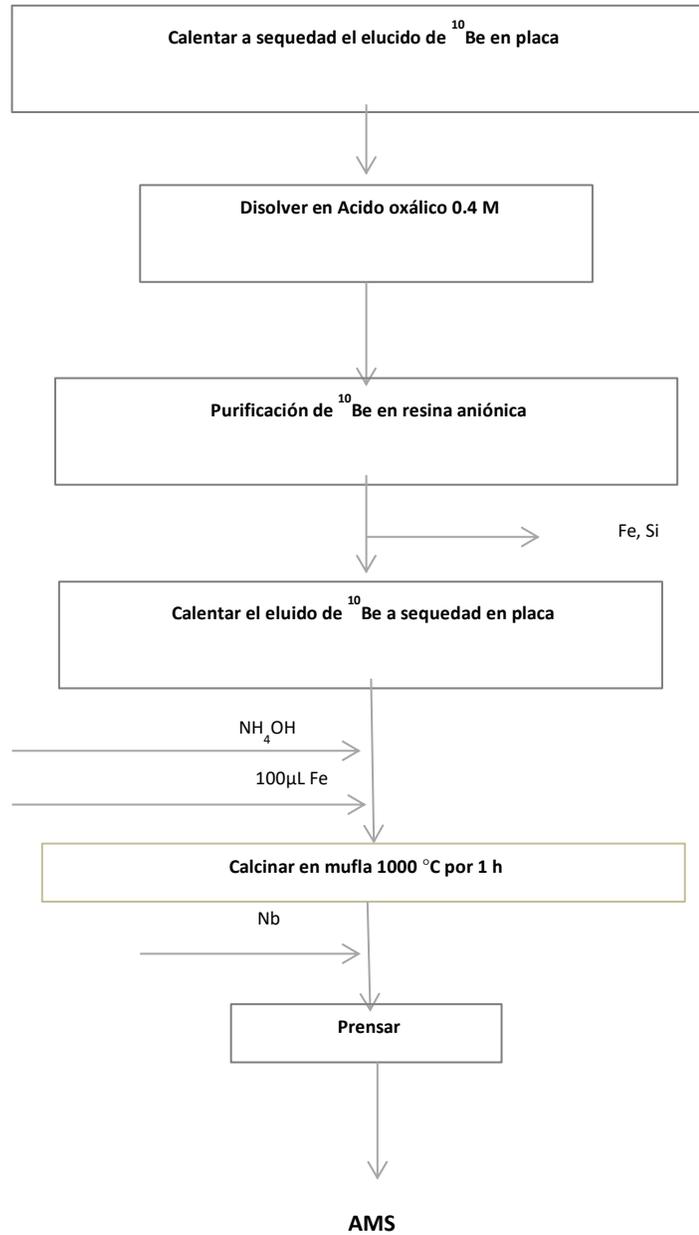


FIGURA 12: Procesamiento radioquímico de los filtros de cuarzo PM_{2.5}

4.8 Procesamiento de datos

La duración de las medidas fue de 1 hora en 12 pasos divididos en 10 bloques de 30 segundos por bloque, lo que indica 120 mediciones por cada cátodo de muestra. Una vez obtenidos los cocientes isotópicos mediante la medición en AMS, se procede al procesamiento de los datos y la posterior determinación de la concentración de ^{10}Be según. (Balco, 2006)

$$[^{10}\text{Be}] = \frac{1}{M} \left(\frac{r_{mr} \times m_{carrier} \times N_a}{M(\text{Be})} - \frac{r_{bm} \times m_{carrierb} \times N_a}{M(\text{Be})} \right)$$

- r_{mr} : cociente isotópico de la muestra normalizado con los cocientes isotópicos del estándar
- $M(\text{Be})$: masa molecular de Berilio 9.01 g/mol
- r_{bm} : cociente isotópico del blanco de la muestra normalizado con los cocientes isotópicos del estándar
- $m_{carrier}$: masa del trazador de ^9Be añadido a la muestra
- $m_{carrierb}$: masa del trazador de ^9Be añadido al blanco de la muestra
- N_a : número de Avogadro 6.022×10^{23} átomos/g mol

El cálculo de la incertidumbre se realizó mediante la siguiente ecuación

$$\sigma_{N_{10}} = \sqrt{\left(\frac{\partial N_{10}}{\partial R_{10/9}} \partial R_{10/9} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_{10}}{\partial n_{10,b}} \partial n_{10,b} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_{10}}{\partial Mc} \partial Mc \right)^2}$$

- N_{10} : $[^{10}\text{Be}]$ concentración de ^{10}Be
- $R_{10/9}$: r_{mr} cociente isotópico entre el isótopo raro y el isótopo estable $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$
- Mc : $m_{carrier}$ Masa del isótopo estable ^9Be que se utiliza para marcar el filtro de estudio

Las pruebas de contraste para demostrar la significancia de las concentraciones de ^{10}Be obtenidas en cada temporada de muestreo fueron las siguientes: Para determinar la diferencia significativa entre las varianzas muestrales de las dos temporadas de medición, se realizó la prueba de contraste F para la comparación de desviaciones estándar, con el objetivo de comparar los errores aleatorios de las dos temporadas. Se efectuó un contraste de dos colas tal y como describen (Miller & Miller, 2002) considerando la hipótesis nula de que $H_0: s_1 = s_2$

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} > 1; \nu_1 = n_1 - 1; \nu_2 = n_2 - 1$$

- F : Contraste de significación entre desviaciones estándar
- s_1 y s_2 : Desviación estándar de T1 y T2 respectivamente
- ν : grados de libertad del numerador y denominador respectivamente
- n_1 y n_2 : número de mediciones en T1 y T2 respectivamente

Para hacer la comparación del estadígrafo calculado experimentalmente y el valor crítico tabulado se utilizó la tabla A.4 reportada por (Miller & Miller, 2002) para contraste de dos colas. Considerando que las desviaciones estándar tienen diferencias significativas, para un valor de significancia del 5%, se calcula el estadígrafo t . como se describe en Miller et al. Se considera como hipótesis nula que no hay diferencias significativas entre las concentraciones de ^{10}Be entre las temporadas de muestreo

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}; g.l = \frac{(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2})^2}{\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1 - 1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2 - 1)}}$$

- $g.l$: Grados de libertad donde el resultado se redondea un número entero
- t : Contraste de significancia entre dos medias muestrales
- n_1 y n_2 : número de mediciones en T1 y T2 respectivamente
- \bar{X}_1 y \bar{X}_2 : Medias muestrales de T1 y T2 respectivamente
- s_1 y s_2 : Desviación estándar de T1 y T2 respectivamente

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Optimización de la corriente con muestras blanco de ^{10}Be

Las muestras blanco BkBe se prepararon de la misma forma que los blancos utilizados para la sintonización del sistema AMS. El BeO final, se obtuvo precipitando directamente la disolución de ^9Be utilizada como trazador en muestras reales, centrifugación; liofilización; calcinación y prensado. En la **Figura 14** se muestran las corrientes obtenidas de las tres réplicas que se prepararon para este ensayo. Los máximos de corriente para las muestras, correspondieron a 795 nA para BkBe₁, 270 nA para BkBe₂ y 483 nA para BkBe₃. La corriente promedio alcanzada entre las tres réplicas durante todo el tiempo de medición fue 516 nA.

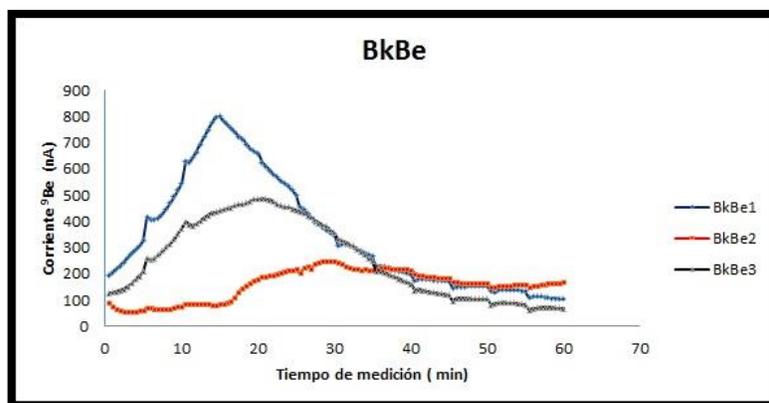


FIGURA 13: Comportamiento de la corriente de las muestras con solo trazador ^9Be

Las muestras BeA se pasaron por la primera resina de intercambio iónico. Dichas muestras presentan máximos de corriente en los puntos 1530nA y 1406 nA para BeA₁ y BeA₂ respectivamente a las de los blancos usados en el experimento anterior, **Figura 15**. La tercera réplica BeA₃ tuvo una corriente más baja de aproximadamente 527 nA en su máximo.

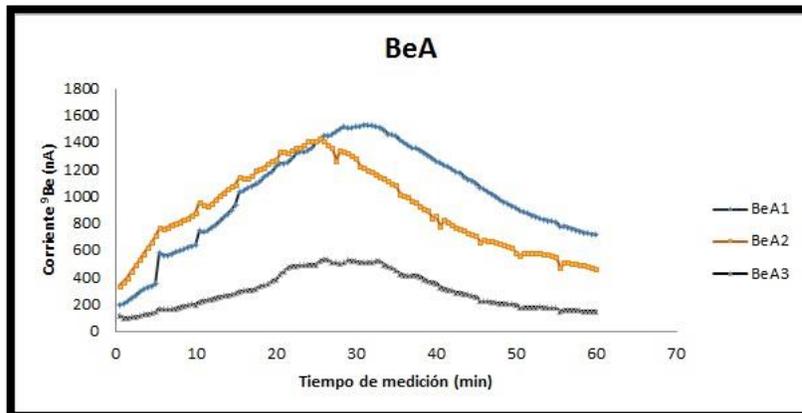


FIGURA 14: Corrientes de los eluidos de la resina aniónica

Las corrientes observadas para BeA₃ son similares a las correspondientes a las muestras que no pasaron por ninguna resina. **Figura 15.**

Las muestras BeAB que pasaron por la primera y segunda resina muestran un comportamiento similar, con corrientes por encima de 500 nA y con un comportamiento estable a partir del minuto 30 **Figura 16.**

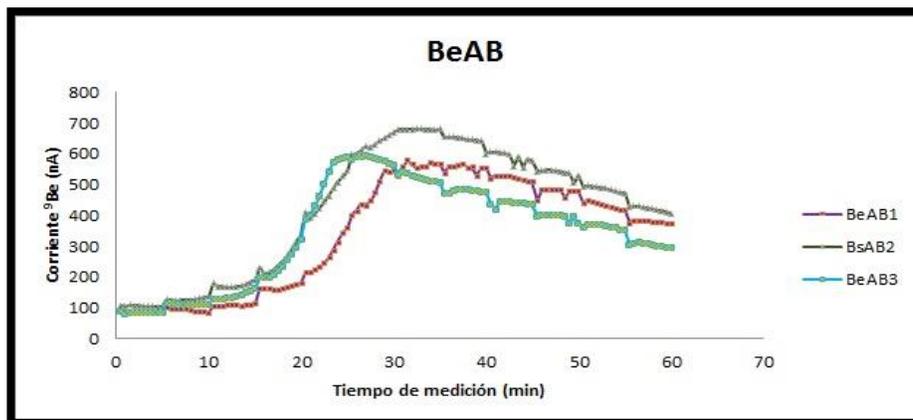


FIGURA 15: Distribución de corrientes de las réplicas de los eluidos de las resinas aniónica y catiónica

Sus corrientes máximas concuerdan más con el blanco de ^9Be realizado en el laboratorio en el primer ensayo (**Figura 14**). Comparando los máximos de corriente alcanzados con las réplicas pasadas por una resina (**Figura 15**) y las pasadas por dos resinas (**Figura 16**) se ve una disminución del máximo de aproximadamente 500 nA un 33.3% de la corriente alcanzada al pasar las muestras por una sola resina. Se observan las réplicas BeAB₁ rojo, BeAB₂ negro y BeAB₃ verde y con comportamientos similares según lo esperado en el método seguido con el MRC.

En el caso de la triada que pasó por las tres resinas según el procesamiento de muestra indicado por (Padilla S. , 2015) y (Gaitán, 2018), se observa que los máximos de corriente en dos de sus réplicas se encuentran entre 700 nA y 800 nA pero se gastan muy rápido los cátodos a partir de aproximadamente los primeros 20 min de medición. **Figura 17**

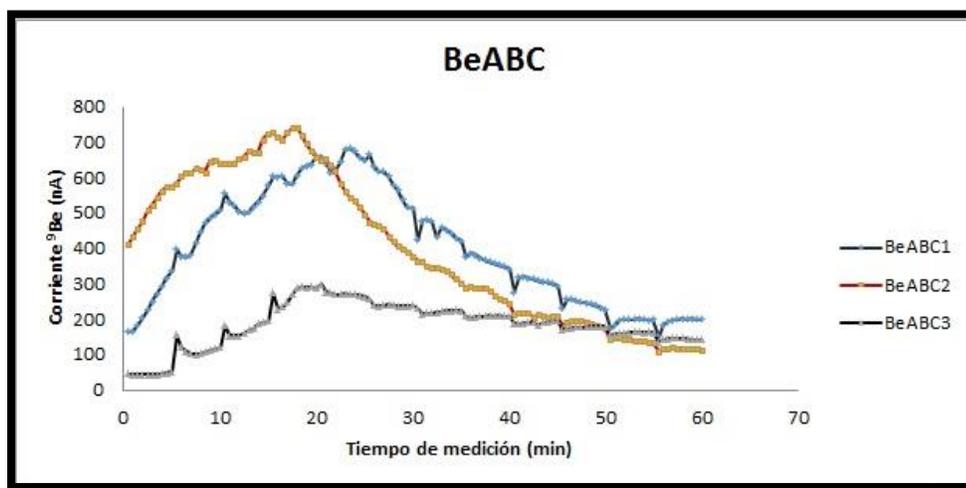


FIGURA 16: Distribución de corrientes de eluidos de la metodología tradicional (propuesta por Padilla 2015 y Gaitán 2018).

Comparando las muestras que pasan por las tres resinas BeABC, y las que no pasaron por resinas, BkBe, observamos la media de sus corrientes máximas alcanzadas en cada réplica 505.3 nA y 564 nA

respectivamente, las cuales no difieren mucho. Esto mismo se observa en las muestras BeAB con una media de 616 nA, alrededor del minuto 20 a 30 de la medición. Una significativamente mayor corriente se obtuvo con BeA cuya corriente media fue de 1146 nA.

En estos experimentos se estudió, además, la calidad de los espectros de la cámara de ionización de gas **Figura 18**. La zona oscura corresponde a la región de integración correspondiente a las cuentas de ^{10}Be . Las cuentas que aparecen fuera de esta zona corresponden a isóbaros masa 10, constituidas principalmente por cuentas ^{10}B y otros fragmentos de masa total 10.

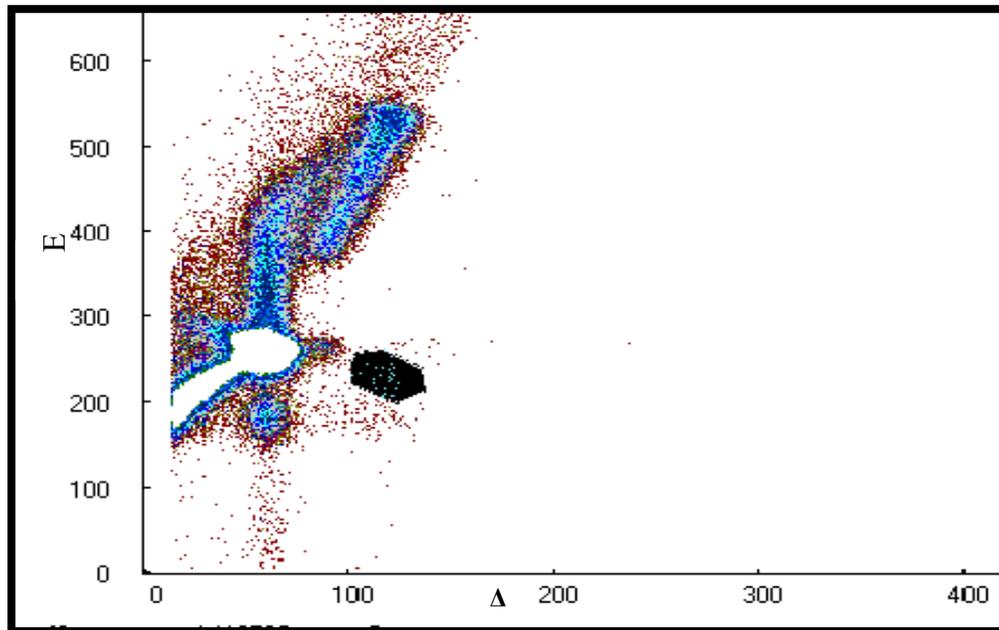


FIGURA 17: Espectro de eluidos obtenidos con cristalería de borosilicato. La región de cuentas de ^{10}Be (zona oscura) se encuentra contaminada por el interferente isobárico ^{10}B y los fragmentos de masa 10.

El boro es el isóbaro que interfiere en la medición de ^{10}Be en el AMS. Cuando ^{10}B no se filtra adecuadamente durante la medida en el AMS, los espectros que se obtienen son muy sucios, como el caso de

la **Figura 18**. Por este motivo y aunque no se esperaban cuentas de ^{10}Be se observó que las cuentas de ^{10}B invadían la zona de energía donde se observa normalmente el ^{10}Be .

Estas cuentas fueron identificadas como cuentas de ^{10}Be cuando en realidad no lo eran. Este exceso de cuentas de ^{10}B en el espectro puede deberse al uso de cristalería de borosilicato, la cual aporta a la muestra una cantidad de ^{10}B adicional que se ve reflejada en el espectro, **Figura 18**. Por ello se decidió repetir nuevamente este estudio de optimización de corriente empleando exclusivamente vasos de Teflón que no aportan isóbaros de ^{10}Be .

Para la muestra BKBe y BeA se obtuvo un comportamiento similar (**Figura19**).

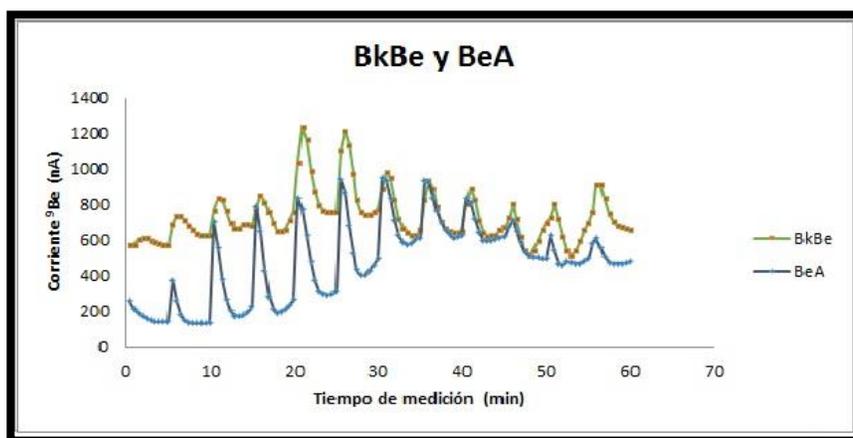


FIGURA 18: Corrientes de las réplicas eluidas solo con ^9Be usando vasos de Teflón superpuestas con eluidos de la primera resina de separación aniónica

Al parecer en el momento de medición el equipo aún se estaba acondicionando, ya que se observan chispas de corriente al inicio de cada paso de secuencia, son 10 pasos de 12 secuencias, por lo que se observan 12 picos durante la hora de medición. Es importante hacer hincapié en los valores de corriente, sin pasar por ninguna resina de separación cromatográfica se obtienen valores más altos de corriente que pasando por la primera resina de separación aniónica. BkBe inicia en 600 nA alcanzando un máximo de hasta 900 nA sin

considerar las chispas de corriente. En el caso de la muestra BeA sus valores de corriente oscilan entre 200 nA y 600 nA sin considerar los saltos de corriente que se observan. El cátodo se mantuvo más uniforme durante la medición, no se gastó el cátodo en medio de la medición, proceso indicativo de una mejor homogeneización de la muestra con Nb al ser añadida al cátodo y una preparación radioquímica más limpia de la muestra debido a la cristalería de Teflón. El comportamiento de corriente no es el esperado pero es similar en las dos muestras lo que indica que las irregularidades se deben a la uniformidad con que inciden las partículas de Cs para extraer los iones negativos de la fuente de iones del acelerador ésta puede ser la causa de estos máximos que se observan en ambos casos.

Seguidamente se procedió a agregar 250 μL de ^9Be en un vaso de Teflón y se hicieron pasar por la segunda resina de separación catiónica directamente, el eluido BeE se precipitó, liofilizó, calcinó y midió en AMS. Igualmente se muestra de forma comparativa el eluido resultante de la primera separación cromatográfica. La **Figura 20** muestra el comportamiento similar de los eluidos en ambos casos de estudio.

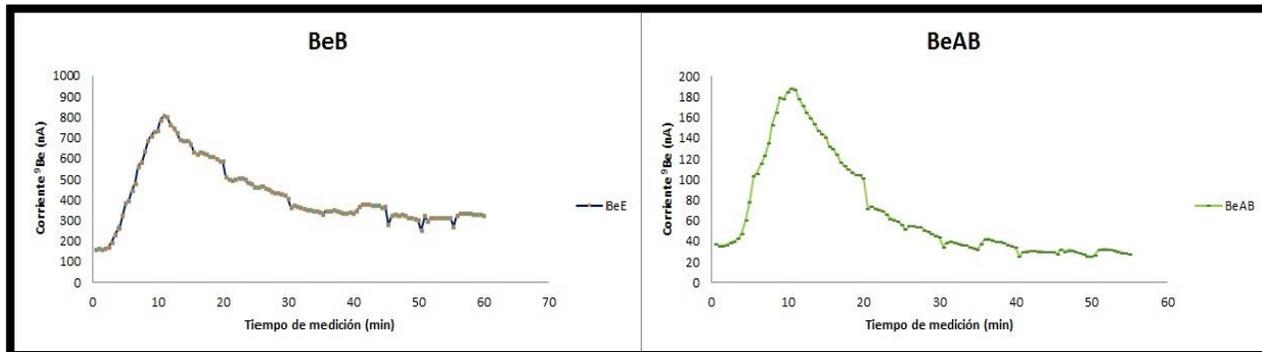


FIGURA 19: Izquierda: Eluido directamente en la resina de separación aniónica BeE. Derecha: Eluido resultante de la separación catiónica y aniónica BeAB

La diferencia principal sigue siendo el máximo de corriente, estos comportamientos de la corriente son más similares a los obtenidos con la cristalería de borosilicato. El cátodo se mantiene elevando su corriente

hasta llegar a un máximo antes de los 30 min de medición y después se va gastando gradualmente. En el caso de la elución directa sin pasar por la primera separación aniónica, los máximos de corriente se encuentran en el orden de los 800 nA y disminuye hasta alrededor de los 400 nA, en el caso del eluido resultante de la separación aniónica y catiónica, la corriente ya es más baja alcanzando su máximo de corriente aproximado en 200 nA y manteniéndose hasta alrededor de 40 nA hasta el final de la medición. La diferencia de alrededor de 600 nA entre la elución directa y la resultante de la primera separación, da a entender una inevitable pérdida de ^9Be en este punto del procesamiento radioquímico.

En la **Figura 21** se muestra la superposición de los dos eluidos y la diferencia de máximos corriente es más visible. Esto demuestra, que, aunque el comportamiento es similar, se pierde una fracción importante

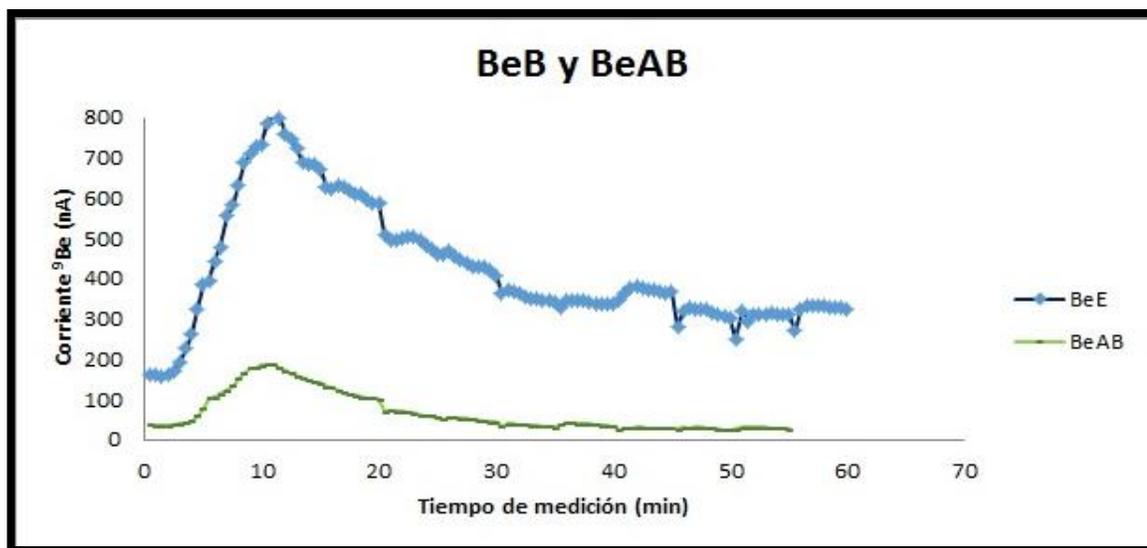


FIGURA 20: Superposición de las corrientes de los eluidos pasados por la segunda resina de separación catiónica

de muestra de interés. Los ensayos con la cristalería de borosilicato obtuvieron hasta este punto del experimento mayores corrientes, pero, a juzgar por la limpieza de los espectros se puede considerar que estas altas corrientes se debían a la presencia de fragmentos de igual masa que pudieron sobreestimar el

comportamiento de la corriente en este estudio. Los resultados más similares con el estudio anterior fueron las réplicas con menor corriente que alcanzaron máximos hasta 200 nA **Figura 15**, la réplica BeA₃.

La repetición del estudio con el procedimiento radioquímico completo incluyendo la purificación del Be obtuvo tendencias similares a los estudios anteriores. La **Figura 22** muestra los resultados. Nótese que en la secuencia 6 se obtuvo un mínimo de corriente y posteriormente se recuperó el valor de tendencia estable.

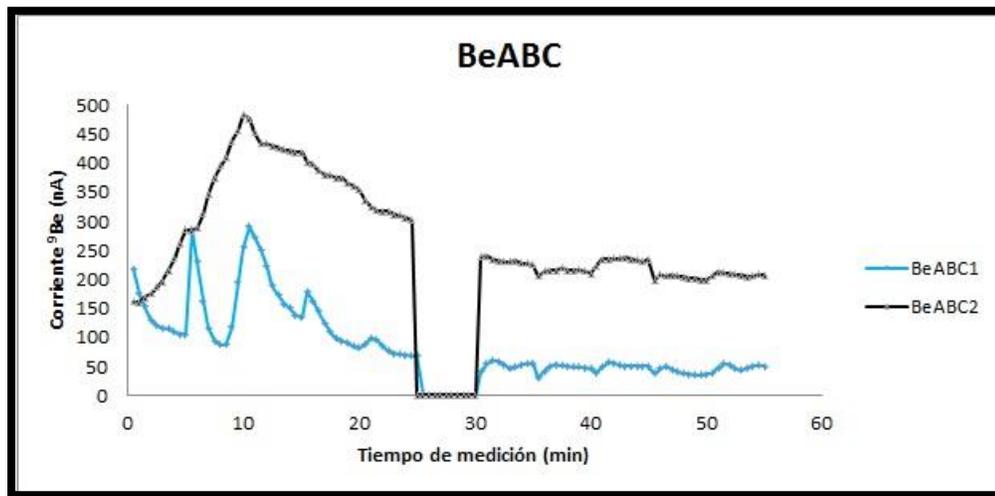


FIGURA 21: Distribución de corrientes de eluidos de la metodología tradicional (propuesta por Padilla 2015 y Gaitán 2018)

Ocurrió lo mismo con las dos réplicas que se muestran. En este paso del procesamiento, la corriente no excedió de 500 nA y las réplicas se observaron en rangos de corriente diferentes pero ambas tuvieron la caída de corriente en el mismo punto, lo que muestra otra chispa del equipo en este punto de la medición.

La **Figura 23** muestra la Superposición de los eluidos de la segunda y tercera resina, se observa una clara pérdida de corriente en cada paso.

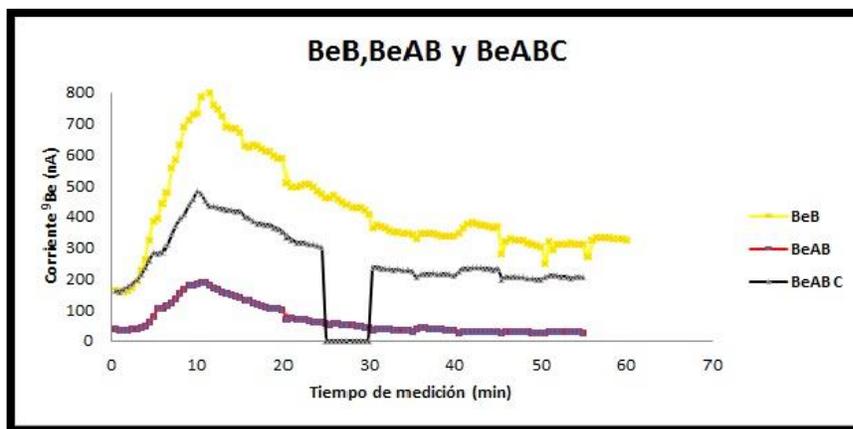


FIGURA 22: Distribución de corrientes de eluidos de la metodología tradicional (propuesta por Padilla 2015 y Gaitán 2018)

Obviando la caída de corriente en la secuencia 6 de medición BeABC, el comportamiento es similar inclusive al estudio con cristalería de borosilicato. Se alcanza un máximo antes de los 30 min seguido de una estabilidad hasta el final de la medición. En total, el máximo de corriente que se obtiene entre todas las combinaciones es en el ensayo BeAB, por esta razón se realizará el estudio con MRC hasta este punto de separación para obtener un valor óptimo de corriente y radioisótopo de interés. Se propone variación a la metodología propuesta por Padilla 2015 y Gaitán 2018.

Los ensayos realizados con cristalería de borosilicato y vasos de Teflón arrojaron máximos de corriente diferentes. Estos valores son muy relevantes, debido a que se trabaja con cantidades muy pequeñas de muestra y mantener una buena corriente es crucial, al punto que determina que se detecten o no las cuentas de ^{10}Be en el detector. Es inevitable que durante el proceso de filtrado a través de la ventana de SiN al que se somete el haz que contiene el isótopo de interés (^{10}Be) y su isóbaro interferente (^{10}B), se pierda parte del haz de ^{10}Be . Siempre se obtiene una fracción de la muestra que se encuentra inicialmente en el cátodo en la fuente de iones. Aquí se resalta la regularidad con que se debe optimizar el sistema con la medición de muestras blanco.

Se observa en la repetición del ensayo con vasos de Teflón que los espectros estuvieron más limpios. Este es un punto fundamental a la hora de tratar con muestras reales porque, aunque la corriente no se vea considerablemente afectada por el tipo de material empleado en la preparación de muestras, las cuentas adicionales que aparecen en el detector, en el área de ^{10}Be , pueden falsear los resultados. **Figura 24**

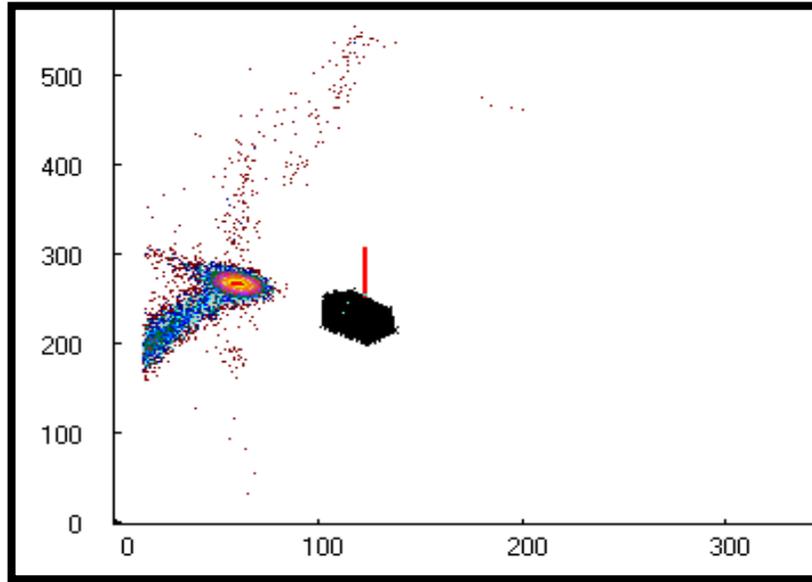


FIGURA 23: Espectro con cristalería de Teflón

Los blancos preparados con trazador ^9Be se procesaron de la misma manera que una muestra real empleando 10 pasos de 12 secuencias durante 60 min de medición. Los gráficos bidimensionales $E_{\text{res}} \Delta E$ muestran la separación del haz después de pasar por el último stripper que sería la lámina SiN que aprovechando las velocidades de frenado del ^{10}Be y el ^{10}B puede separar en regiones detectables las cuentas de cada isótopo sin que estas invadan la región del otro.

5.2 Obtención de ^{10}Be presente en el MRC NIST 1648a

En esta sección se describe el análisis del Material de Referencia Certificado de un polvo urbano *NIST 1648 a* para la caracterización de ^{10}Be , material de referencia cuya concentración de ^{10}Be no ha sido reportada. Adicionalmente, como se describió en la sección de metodología, en las medidas de rutina se analizan un blanco (carente de ^{10}Be) y un estándar con un cociente isotópico nominal conocido (STD 51: 2.71×10^{-11}). Los resultados obtenidos de la medición de las muestras mediante AMS se llevan a cabo en 12 secuencias de 10 ciclos de 5 min cada uno, midiéndose un total de 1 hora cada muestra. Con las cuentas de ^{10}Be , la corriente de ^9Be se obtiene el cociente isotópico $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, y mediante procedimientos estadísticos se logra obtener la concentración de ^{10}Be en las muestras en átomos/gramo de muestra.

La **Tabla 4** muestra las concentraciones e incertidumbres propagadas según el método de (Balco, 2006).

TABLA 4: Relación de concentraciones obtenidas de las 4 réplicas realizadas del MRC NIST 1648a y un blanco

MUESTRA	COCIENTE ISOTÓPICO $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$	σ $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$	^9Be TRAZADOR (g)	σ ^9Be (g)	MASA MRC (g)	[^{10}Be] (átomos/g muestra)	σ (átomos/g muestra)
1	6.43×10^{-12}	1.02×10^{-13}	2.50×10^{-4}	2.50×10^{-6}	1.51×10^{-1}	6.97×10^8	7.13×10^6
2	6.41×10^{-12}	8.09×10^{-14}	2.50×10^{-4}	2.50×10^{-6}	1.51×10^{-1}	6.93×10^8	7.09×10^6
3	5.83×10^{-12}	8.44×10^{-14}	2.50×10^{-4}	2.50×10^{-6}	1.50×10^{-1}	6.35×10^8	6.52×10^6
4	6.11×10^{-12}	1.27×10^{-13}	2.50×10^{-4}	2.50×10^{-6}	1.50×10^{-1}	6.64×10^8	6.81×10^6
B	1.44×10^{-13}	1.15×10^{-14}	2.50×10^{-4}	2.50×10^{-6}	-	-	-

Para el MRC *NIST 1648a* se obtuvo una concentración promedio de $^{10}\text{Be} = 6.72 \times 10^8 \pm 1.14 \times 10^8$ átomos/g. Según la incertidumbre expandida. La concentración obtenida es del orden de 10^8 átomos/g de muestra concordante con lo reportado para muestras ^{10}Be depositado en la superficie del suelo por (Chen, 2017). Los resultados obtenidos para material de referencia de polvo urbano, confirman que fue acertado

haber incluido modificaciones a la metodología tradicional que incluye tres resinas de separación por intercambio iónico, conservando solo las dos primeras.

El mismo estudio con el método tradicional de este material de referencia (*NIST 1648a*) se realizó con diferentes analistas y diferentes laboratorios, en LEMA (Carmen Grisel Méndez García) CGMG y en el Centro Nacional de Aceleradores CNA de Sevilla, España Karen Gaitán de los Ríos (KGR), en cada caso se realizaron 6 y 7 réplicas de MRC y se pesaron 25 mg de muestra para una misma cantidad de trazador de ^9Be .

La comparación de los resultados obtenidos con el método tradicional y el método modificado por Malvis Robaina Mesa (MRM) se muestran a continuación a modo comparativo. Se obtuvieron concentraciones en el mismo orden de magnitud como se muestra en la **Tabla 5**.

TABLA 5: Comparación con estudios similares

LUGAR ANALISTA	[^{10}Be] PROMEDIO (átomos/g muestra)	σ (átomos/g muestra)
CNA KGR	8.80×10^8	3.89×10^8
LEMA CGMG	1.72×10^8	6.40×10^7
LEMA MRM	6.72×10^8	8.30×10^7

Independientemente de la metodología, laboratorio y analista, las concentraciones presentan el mismo orden de magnitud, por lo que queda confirmada la repetibilidad y reproducibilidad del método. En consecuencia, en dependencia de la matriz de la muestra analizada, se puede prescindir de la separación cromatográfica con la resina de purificación de berilio.

Seguidamente se muestra una intercomparación de los diferentes métodos de determinación de ^{10}Be por diferentes analistas en diferentes laboratorios con diferentes metodologías y números de réplicas. **Figura 25.**

Tabla 6.

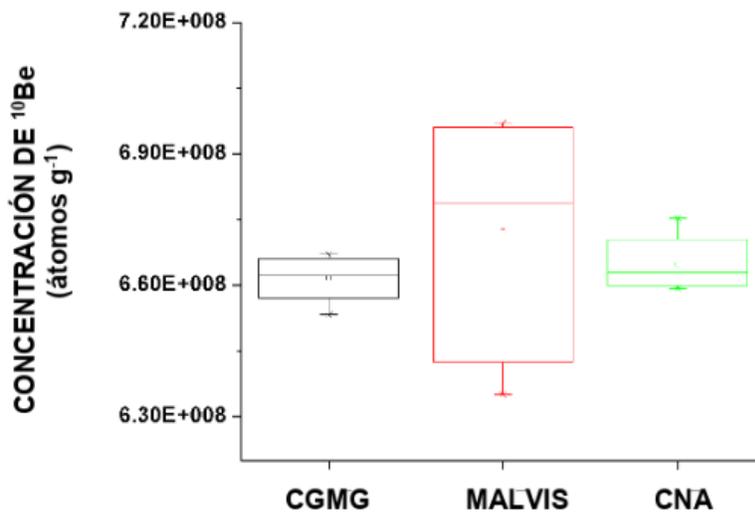


FIGURA 24: Concentraciones promedio de ^{10}Be en MRC

Con esta imagen se ratifica la reproducibilidad y repetibilidad del método propuesto para extraer ^{10}Be de muestras de aerosol urbano con pequeño tamaño de partícula. La variabilidad de las concentraciones se encuentra en el mismo rango, obteniéndose una concentración similar con el método modificado hasta la segunda resina de separación cromatográfica por intercambio iónico.

Los resultados con el método propuesto muestran una alta dispersión debida, probablemente, a una menor purificación del ^{10}Be . Sin embargo, los valores promedios obtenidos en este estudio experimental son similares. La similitud de los métodos CGMG (Dra. Carmen Grisela Méndez García) y CNA (M. Karen Gaitán de Los Ríos)

se debe a que se realizaron sin modificación a la metodología radioquímica, es decir, se empleó el método tradicional de separación, purificación y obtención de ^{10}BeO .

Con este estudio se ratificó la reproducibilidad y repetibilidad del método propuesto para extraer ^{10}Be de muestras de aerosol urbano con pequeño tamaño de partícula.

5.3 ^{10}Be en filtros de aerosoles

Para el análisis de aerosoles atmosféricos colectados en filtros de cuarzo, se dispuso a incluir la tercera resina, debido a que estos filtros podrían contener Ca^{2+} , un importante interferente en la purificación de ^{10}Be . En la separación en la tercera resina de purificación, se perderá un pequeño porcentaje del ^{10}Be que se encuentra en la muestra, pero se obtendrá una porción más pura de ^{10}Be .

Para el procesamiento de aerosoles urbanos recolectados en la campaña UNAM (CU) 2015, los filtros se cortaron en pequeños trozos y se pesaron, posterior a la adición del portador de ^9Be . Con las muestras se procesó un blanco de laboratorio para corregir posteriormente las interferencias del procesamiento radioquímico. En la **Tabla 6** se muestran los valores de $\text{PM}_{2.5}$ depositado y las concentraciones de ^{10}Be en átomos por gramo de muestra obtenidas para las dos temporadas de muestreo. Las mediciones efectuadas en los meses de febrero, noviembre y diciembre, corresponderán a la época poco lluviosa del año que se denominarán (T1) y las mediciones realizadas en los meses de marzo y abril pertenecerán a (T2), que corresponde a la transición entre la época poco lluviosa y lluviosa de 2015. En T1 se muestrearon 13 filtros y en T2, 16 filtros.

Considerando la sumatoria de las concentraciones de ^{10}Be obtenidas, en T1 (4.03×10^{10}) son mayores que en T2 (2.18×10^{10}). Aunque los órdenes de magnitud se mantienen similares en las dos temporadas de muestreo, la proporción de partículas recolectadas en cada etapa, fue ligeramente mayor en T1 ($1.282 \pm 5.02 \times 10^{-2}$) que en T2 ($1.167 \pm 6.60 \times 10^{-2}$) un gramo aproximadamente en cada temporada. En T1 el filtro 77 con mayor cantidad

de material particulado depositado, correspondiente al periodo 9 de diciembre y 10 de diciembre de 2015, no tuvo la mayor concentración de ^{10}Be ; sin embargo el filtro 78 muestreado entre el 12 de diciembre y el 14 de diciembre de 2015 tuvo menor cantidad de partículas depositadas y la mayor concentración de berilio de toda la temporada. En la segunda temporada de transición entre época poco lluviosa y lluviosa, la mayor cantidad de material colectado fue en filtro 50 del 19 de marzo al 21 de marzo y de igual manera tuvo la menor concentración de ^{10}Be de toda la temporada. En general, en esta temporada, las concentraciones se mantuvieron similares, excepto en los filtros 46 del 11 de marzo al 13 de marzo y 63 del 16 de abril al 18 de abril de 2015 donde las concentraciones fueron altas, siendo esta observación inversamente proporcional al material depositado en esos períodos de muestreo.

Tabla 6: Concentraciones de los filtros de aerosoles obtenidas en cada temporada de muestreo

TEMPORADA	No. DE FILTRO	FECHA DE MUESTREO	VOLUMEN AIRE MUESTREADO (m ³)	MATERIAL PARTICULADO DEPOSITADO(g)	[¹⁰ Be] (átomos/g)	[¹⁰ Be] (átomos/m ³)
T1 (FEBRERO, NOVIEMBRE, DICIEMBRE)	36	18-Feb-15	5637.30 ± 281.87	0.10768 ± 0.0019	3.55 x 10 ⁸ ± 5.94 x 10 ⁷	1.98 x 10 ⁴ ± 3.47 x 10 ³
	45	20-Feb-15	5247.32 ± 262.37	0.04202 ± 0.0007	1.35 x 10 ⁸ ± 1.40 x 10 ⁸	7.60 x 10 ³ ± 7.93 x 10 ³
	44	22-Feb-15	4971.01 ± 248.55	0.04864 ± 0.0008	8.92 x 10 ⁸ ± 5.63 x 10 ⁸	6.45 x 10 ⁴ ± 4.08 x 10 ⁴
	43	24-Feb-15	5172.43 ± 258.62	0.08047 ± 0.0014	7.90 x 10 ⁸ ± 7.14 x 10 ⁷	6.09 x 10 ⁴ ± 6.33 x 10 ³
	37	26-Feb-15	5388.01 ± 269.40	0.06278 ± 0.0011	2.19 x 10 ⁸ ± 5.84 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁴ ± 3.94 x 10 ³
	71	25-Nov-15	2982.24 ± 149.11	0.15180 ± 0.0026	3.01 x 10 ⁸ ± 2.19 x 10 ⁸	1.68 x 10 ⁴ ± 1.23 x 10 ⁴
	72	27-Nov-15	3731.38 ± 186.57	0.14212 ± 0.0025	4.14 x 10 ⁸ ± 2.50 x 10 ⁸	2.32 x 10 ⁴ ± 1.41 x 10 ⁴
	73	29-Nov-15	2256.35 ± 112.82	0.11587 ± 0.0020	1.24 x 10 ⁹ ± 5.47 x 10 ⁸	6.94 x 10 ⁴ ± 3.08 x 10 ⁴
	74	01-Dec-15	3223.61 ± 161.18	0.12570 ± 0.0022	2.81 x 10 ⁹ ± 8.41 x 10 ⁸	1.57 x 10 ⁵ ± 4.77 x 10 ⁴
	76	07-Dec-15	2828.48 ± 141.42	0.14504 ± 0.0025	6.59 x 10 ⁸ ± 2.52 x 10 ⁸	3.69 x 10 ⁴ ± 1.42 x 10 ⁴
	77	09-Dec-15	3248.64 ± 162.43	0.17454 ± 0.0030	7.11 x 10 ⁸ ± 3.24 x 10 ⁸	3.98 x 10 ⁴ ± 1.82 x 10 ⁴
	78	12-Dec-15	1360.60 ± 68.03	0.00420 ± 0.0001	3.05 x 10 ¹⁰ ± 8.03 x 10 ⁹	1.71 x 10 ⁶ ± 4.57 x 10 ⁵
	79	14-Dec-15	1548.34 ± 77.42	0.08196 ± 0.0014	1.32 x 10 ⁹ ± 3.87 x 10 ⁸	7.36 x 10 ⁴ ± 2.20 x 10 ⁴
	T2 (MARZO- ABRIL)	SN	28-Feb-15	6829.84 ± 341.49	0.01838 ± 0.0003	9.44 x 10 ⁸ ± 7.34 x 10 ⁸
41		04-Mar-15	5651.56 ± 282.58	0.06646 ± 0.0012	1.60 x 10 ⁸ ± 5.65 x 10 ⁷	1.42 x 10 ⁴ ± 5.06 x 10 ³
42		06-Mar-15	5856.66 ± 292.83	0.08048 ± 0.0014	5.12 x 10 ⁸ ± 2.53 x 10 ⁸	4.19 x 10 ⁴ ± 2.08 x 10 ⁴
46		11-Mar-15	5835.09 ± 291.75	0.02157 ± 0.0004	2.26 x 10 ⁹ ± 2.55 x 10 ⁸	5.69 x 10 ⁴ ± 7.07 x 10 ³
47		13-Mar-15	5937.47 ± 296.87	0.02349 ± 0.0004	3.76 x 10 ⁸ ± 1.91 x 10 ⁸	8.61 x 10 ³ ± 4.39 x 10 ³
48		15-Mar-15	5709.04 ± 285.45	0.02593 ± 0.0004	6.06 x 10 ⁸ ± 1.38 x 10 ⁸	1.56 x 10 ⁴ ± 3.65 x 10 ³
49		17-Mar-15	5859.16 ± 292.96	0.03728 ± 0.0006	5.42 x 10 ⁸ ± 2.10 x 10 ⁸	1.90 x 10 ⁴ ± 7.39 x 10 ³
50		19-Mar-15	5907.88 ± 295.39	0.26537 ± 0.0046	8.80 x 10 ⁷ ± 1.40 x 10 ⁷	4.26 x 10 ³ ± 7.11 x 10 ²
51		21-Mar-15	3363.07 ± 168.15	0.17723 ± 0.0031	1.82 x 10 ⁸ ± 2.92 x 10 ⁷	1.02 x 10 ⁴ ± 1.71 x 10 ³
60		12-Apr-15	5028.71 ± 251.44	0.06836 ± 0.0012	3.09 x 10 ⁸ ± 7.38 x 10 ⁷	4.61 x 10 ³ ± 1.13 x 10 ³
61		14-Apr-15	4838.44 ± 241.92	0.05002 ± 0.0009	7.34 x 10 ⁸ ± 6.10 x 10 ⁷	1.07 x 10 ⁴ ± 1.05 x 10 ³
62		16-Apr-15	4863.20 ± 243.16	0.12016 ± 0.0021	1.12 x 10 ⁹ ± 5.08 x 10 ⁸	1.56 x 10 ⁴ ± 7.08 x 10 ³
63		18-Apr-15	4882.48 ± 244.12	0.05549 ± 0.0010	2.70 x 10 ⁹ ± 1.11 x 10 ⁹	3.33 x 10 ⁴ ± 1.37 x 10 ⁴
64		20-Apr-15	4704.80 ± 235.24	0.07786 ± 0.0013	2.18 x 10 ⁹ ± 8.80 x 10 ⁸	3.84 x 10 ⁴ ± 1.57 x 10 ⁴
65		22-Apr-15	4808.92 ± 240.45	0.05371 ± 0.0009	5.25 x 10 ⁹ ± 2.02 x 10 ⁹	6.96 x 10 ⁴ ± 2.70 x 10 ⁴
66		24-Apr-15	5020.40 ± 250.12	0.02547 ± 0.0004	3.81 x 10 ⁹ ± 1.33 x 10 ⁹	2.13 x 10 ⁵ ± 7.54 x 10 ⁴

Para determinar las diferencias significativas entre las medias experimentales de ambas temporadas, se realizaron pruebas estadísticas de contraste de significación basados en las varianzas para determinar las

diferencias significativas entre ambas campañas de muestreo, ya que considerando los promedios individuales entre campañas, T1 ($3.10 \times 10^9 \pm 8.26 \times 10^9$) es mayor que T2 ($1.36 \times 10^9 \pm 1.49 \times 10^9$), teniendo en cuenta los valores de concentración de ^{10}Be obtenidos y considerando los promedios individuales de material depositado en cada temporada, T1 ($9.87 \times 10^{-2} \pm 5.02 \times 10^{-2}$) es mayor que T2 ($7.30 \times 10^{-2} \pm 6.60 \times 10^{-2}$), es decir que se colectó más material en época poco lluviosa que en época de transición, siendo esto proporcional con la concentración de ^{10}Be obtenida en cada temporada.

En la primera prueba de contraste se calculó el estadístico F para determinar la diferencia significativa entre varianzas y así determinar los errores aleatorios de los dos conjuntos de datos, se desea demostrar si ambas temporadas difieren en su precisión, es decir, contraste de dos colas. La significancia entre desviaciones estándar permitirá demostrar posteriormente si las concentraciones obtenidas en cada temporada son diferentes significativamente o no.

El estadístico F se calcula de forma que el cociente entre varianzas sea mayor que 1. La idea es que al comparar las varianzas, el cociente sea cercano a 1 y no haya diferencia significativa entre varianzas. Si la diferencia es muy grande, se rechaza la hipótesis nula. Es decir, si F calculado supera un F crítico, que no es más que el obtenido en tablas, entonces se rechaza la hipótesis nula. Según Miller, “El valor crítico de F depende del tamaño de las dos muestras, del nivel de significación y del tipo de contraste empleado”. Los cálculos se realizaron para $P=0.05$. $F=30$ en este caso y al comparar este valor calculado con el valor crítico en la Tabla A.4 (Miller & Miller, 2002), F crítico dio un valor de 3.177, por tanto se rechaza la hipótesis nula y las desviaciones estándar tienen diferencias significativas, es decir que los valores de ^{10}Be obtenidos en T1 son más dispersos que T2.

A partir de este corolario, se compararon las medias muestrales con la prueba de contraste t donde la hipótesis nula indica que no hay diferencias significativas entre las medias muestrales, es decir, que, aunque hubo muestreo en época poco lluviosa y de transición, la concentración de ^{10}Be no varía. El valor calculado de t fue de 0.75 y los

$g.l=13$ como valor entero aproximado. En la tabla A.2 (Miller & Miller, 2002) de valores críticos para contrastes de t considerando $P=0.05$, t crítico=2.18 por lo que se acepta la hipótesis nula y las medias muestrales no son diferentes significativamente. Es decir, las concentraciones de ^{10}Be se mantienen inalteradas sin depender de la temporada de muestreo. Este importante resultado indica que, a pesar de que hubo una mayor proporción de partículas finas movidas por las masas de aire en T1 con más dispersión y variabilidad entre sus valores que en T2 con valores más exactos. **Figura 26** y que este fenómeno fue proporcional a la concentración de ^{10}Be obtenido, su adherencia a partículas finas no estuvo influenciada de manera significativa por el comportamiento de las variables meteorológicas en cada temporada.

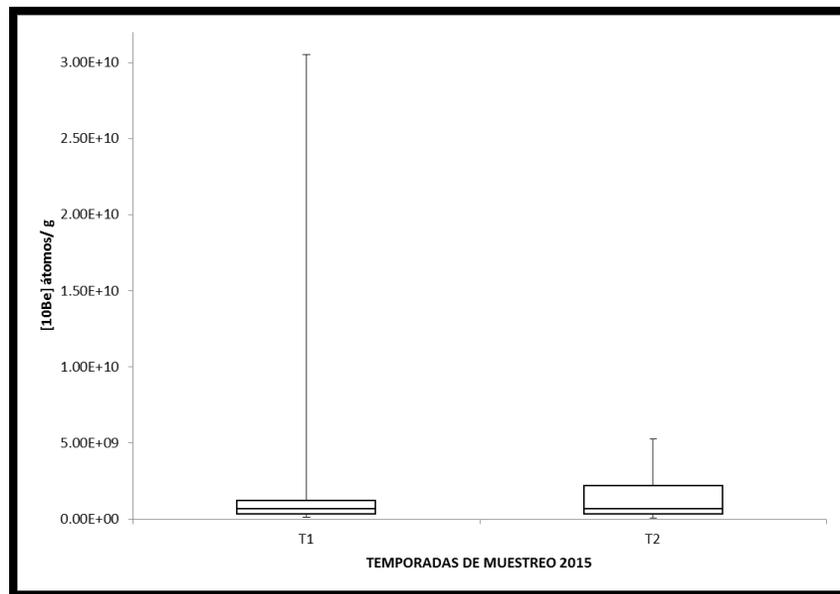


FIGURA 25: Comparación de concentraciones de ^{10}Be (átomos/g) de aerosoles por temporada

Se muestra la distribución de los datos de concentraciones de ^{10}Be de ambas temporadas de medición. Se evidencia la dispersión de los datos. El rango de T1 es mayor que el de T2, es decir, la longitud de la caja y bigote difiere en cada caso debido a la dispersión de los datos. Dentro de la caja se muestra la variabilidad del 50% de los valores, en T2 están más concentrados, lo que indica una menor variabilidad de los datos. La posición

de la mediana muestra si la distribución de los datos es simétrica o no, en T2 la asimetría es positiva, la mediana está más próxima al cuartil 1 (Q1) lo que indica que los valores por encima de la mediana incluyendo el bigote están más dispersos y sesgados positivamente hacia la derecha. Los valores en T2 están más concentrados y menos dispersos.

En la Figura 27 a y b, se ilustra la relación entre el material depositado en el filtro y la cantidad de ^{10}Be obtenido.

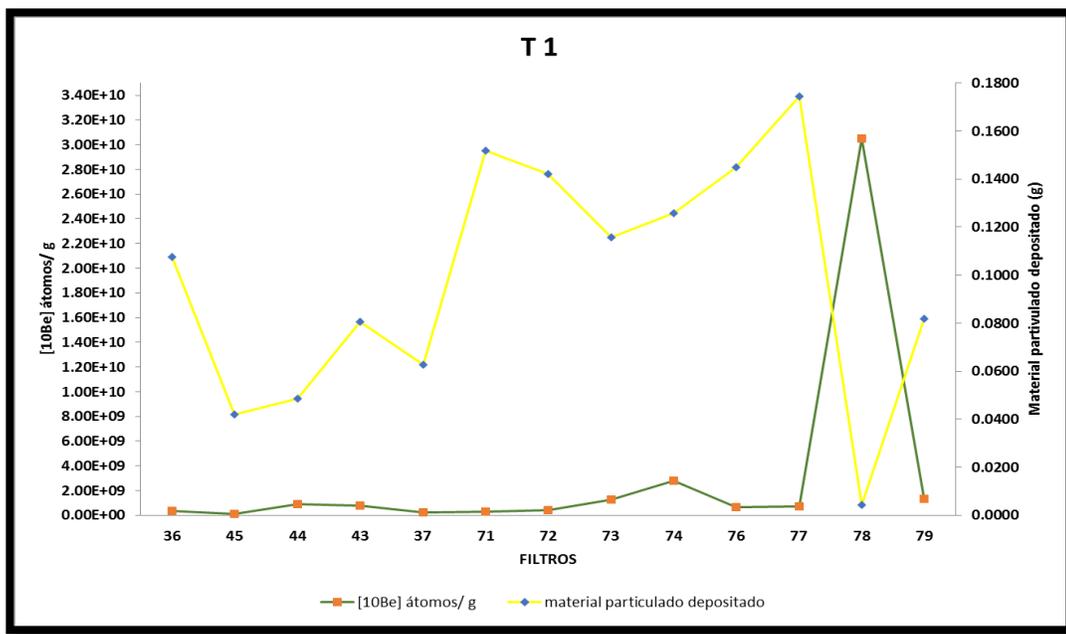


FIGURA 26a: Variaciones estacionales T1 (febrero, noviembre y diciembre 2015)

En la **Figura 27 a**, se observan las variaciones temporales en T1. Los dos picos altos en el material particulado depositado, explican la gran variación en la caja de la **Figura 26**. Comparando los máximos en esta figura, hay días de muestreo donde el ^{10}Be muestra un pico de concentración superior a los demás días, no necesariamente proporcional a la concentración obtenida, pero en promedio esta temporada mantiene una concentración con órdenes de magnitud cercanos.

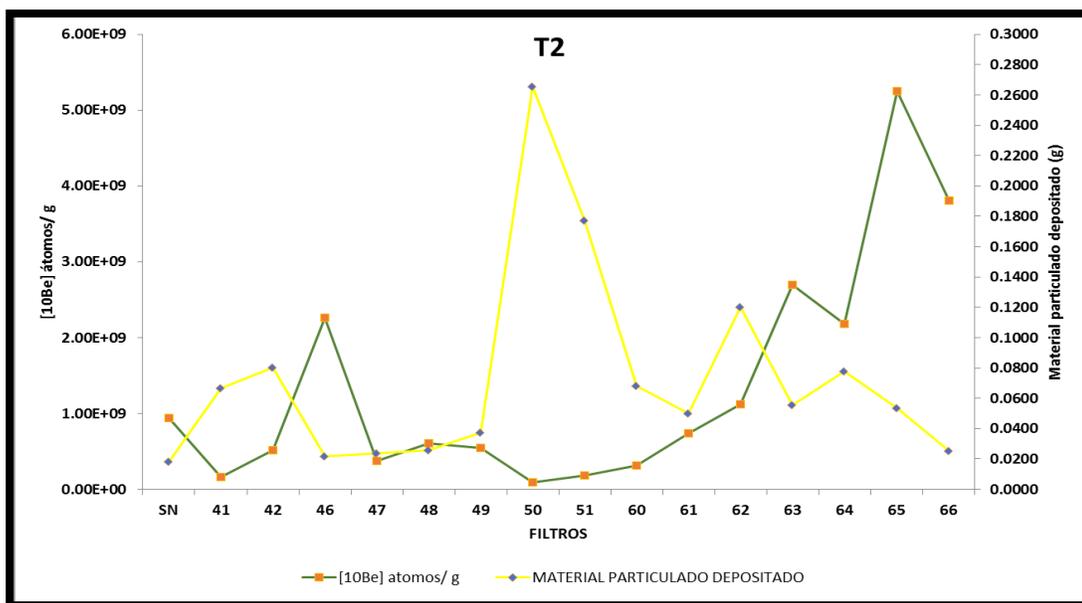


FIGURA 27b: Variaciones estacionales T2 (marzo y abril de 2015)

En la Figura 27 b se muestra una mayor uniformidad entre valores, observándose la mayor cantidad de material depositado en el filtro 50 y a su vez la menor concentración de toda la temporada. A su vez las tres mayores concentraciones de ^{10}Be se obtuvieron en los filtros 65 (22 de abril a 24 de abril de 2015), 63 (18 de abril a 20 de abril de 2015) y 46 (11 de marzo a 13 de marzo de 2015), no siendo esto proporcional con la cantidad de material depositado.

Una mayor concentración de ^{10}Be en T1 puede deberse a una mayor recirculación entre la tropósfera y la estratósfera, que sin embargo no ocurrió en T2 (en los meses de transición), donde la mayor concentración de ^{10}Be se encuentra en la estratósfera y es por esto que se espera que menos cantidad de ^{10}Be se acumule en los filtros. Otra explicación de este comportamiento estacional del ^{10}Be puede relacionarse con un mayor contenido de compuestos orgánicos y minerales del suelo asociados a $\text{PM}_{2.5}$ en T1 que pueden atrapar al ^{10}Be .

Según reporta (McHargue, 1991), es de esperarse que el ^{10}Be tenga mayor afinidad por partículas menores que $1\ \mu\text{m}$ como los sulfatos y debería haber una mayor concentración de ^{10}Be en primavera porque hay un mayor intercambio de masas de aire entre la estratósfera y la tropósfera.

Las condiciones climáticas bajo las cuales se realizaron los monitoreos, son las mismas de la cuenca del Valle de México que se clasifica como tropical. El régimen del tiempo en los trópicos tiene dos estaciones marcadas en el año y que se diferencian por las precipitaciones que se producen; siendo estas la época poco lluviosa o seca (centrada en el invierno) y la época lluviosa del año (centrada en el verano).

Existen meses de transición entre ambas épocas del año, de marzo a mayo como transición entre el período seco y el húmedo, y de finales de septiembre a octubre como transición de la época lluviosa a la poco lluviosa. Éste clima tropical se ve atemperado por la elevada altura respecto al nivel medio del mar y las características geográficas especiales del Valle de México. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen el clima de la cuenca es templado en su porción centro y sur, y seco de tipo estepa en la parte norte y oriente. (Jaúregui E. , 1995)

La mayor cantidad de días con lluvias en la Cuenca del Valle de México, están comprendidos entre los meses de mayo a octubre, ya que las lluvias invernales son más escasas. En promedio sobre la UNAM, se tienen 100 días con lluvia en un año. Mientras tanto, los valores de acumulados de precipitaciones máximas registradas sobre la UNAM alcanzan los 80 mm. (Jaúregui E. , 1998)

Otro fenómeno meteorológico que afecta los niveles de humedad a los que el muestreador se ve sometido, lo constituye la niebla. Al respecto, la zona de la UNAM tiene en promedio anual unas 25 a 30 nieblas. Este fenómeno afectaría marcadamente los valores de humedad específicamente a la altura en que se encuentra el equipo. En general, las nieblas ocurren por el escurrimiento del aire frío nocturno (que es más pesado) hacia las partes más bajas de la cuenca de México. (Jaúregui E. , 1989)

La circulación del viento en la Ciudad de México durante los meses en que se realizó el estudio es la impuesta por los contrastes térmicos que se originan durante el día por el asoleamiento diferencial entre las laderas y la planicie, lo que resulta en vientos que van hacia el perímetro del valle, mientras que por la noche el flujo del aire es opuesto; es decir, el aire frío de las partes altas de las laderas que bordean el valle baja por gravedad hacia el fondo de la planicie. (Jaúregui E. , 1995)

En el período invernal, de noviembre a febrero (T1), el Valle de México es afectado por la llegada de frentes fríos que modifican temporalmente el régimen de vientos, modificando la intensidad y dirección del mismo. En los meses de verano, de junio a septiembre, predomina sobre el valle la influencia de los llamados vientos Alisios húmedos, éstos provocan un incremento en el régimen de lluvias sobre la cuenca del valle y la interacción entre los vientos locales (de valle y de montaña) con los vientos regionales determina la dirección y fuerza de los vientos observados en ésta época del año; aunque las mediciones realizadas para ésta tesis no abarcan éste último período.

Las cantidades de material particulado y los posibles niveles de contaminación atmosférica sobre la Ciudad de México son originados por dos factores principales; por un lado está la erosión de los suelos desnudos de vegetación debida a la acción de los vientos, los cuales levantan nubes de polvo durante la estación seca del año; por otra parte, están las emanaciones de gases y partículas que provienen de la industria y la actividad vehicular [Jaúregui, 1988, 1989, 1995]. La reducida ventilación en una ciudad rodeada por montañas acentúa, y en ocasiones hace críticas, las concentraciones de los diversos contaminantes. (Jaúregui E. , 1995) Las condiciones meteorológicas que favorecen altos niveles de contaminación atmosférica y material particulado se presentan durante el semestre centrado en el invierno y con la presencia de aire estratificado (es decir, el aire más frío y denso se encuentra cerca del suelo), que propicia su estancamiento en el fondo de la cuenca. (Jaúregui E. , 1998)

La **Tabla 8** muestra la comparación de las concentraciones de ^{10}Be en PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ (en átomos/g) durante las Campañas UNAM (CU) en 2012 y 2015 respectivamente para los meses de noviembre y diciembre.

TABLA 7: Comparación entre campañas en CU en 2012 (Gaitán, 2018) y 2015

PM ₁₀ 2012 (átomos/g)		PM _{2.5} 2015 (átomos/g)	
CU1	$6.08 \times 10^8 \pm 1.24 \times 10^7$	71	$3.01 \times 10^8 \pm 2.19 \times 10^8$
CU2	$7.15 \times 10^8 \pm 1.23 \times 10^7$	72	$4.14 \times 10^8 \pm 2.50 \times 10^8$
CU3.1	$7.35 \times 10^8 \pm 1.32 \times 10^7$	73	$1.24 \times 10^9 \pm 5.47 \times 10^8$
CU3.2	$7.98 \times 10^8 \pm 1.33 \times 10^7$	74	$2.81 \times 10^9 \pm 8.41 \times 10^8$
CU4	$3.69 \times 10^8 \pm 1.23 \times 10^7$	76	$6.59 \times 10^8 \pm 2.52 \times 10^8$
CU5.1	$1.14 \times 10^9 \pm 1.66 \times 10^7$	77	$7.11 \times 10^8 \pm 3.24 \times 10^8$
CU5.2	$1.21 \times 10^9 \pm 1.67 \times 10^7$	78	$3.05 \times 10^{10} \pm 8.03 \times 10^9$
CU7.2	$1.02 \times 10^9 \pm 1.40 \times 10^7$	79	$1.32 \times 10^9 \pm 3.87 \times 10^8$
CU7.2	$1.04 \times 10^9 \pm 1.40 \times 10^7$	-	-
MEDIA	8.5×10^8	MEDIA	4.29×10^8
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2.75×10^8	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.69×10^8

Las concentraciones promedio se encuentran en el mismo orden de magnitud, lo que indica que en los meses poco lluviosos se concentra ¹⁰Be en el aire en la misma proporción sin importar el tamaño de partícula. Posterior a los meses de lluvia la mayoría del ¹⁰Be se encuentra depositado y acumulando en la superficie del suelo, siendo menor la proporción de partículas de ¹⁰Be meteórico en el aire. En general se encontró una similitud en las concentraciones tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5}. Estos resultados indican que mientras el ¹⁰Be presente en PM₁₀ se asocia principalmente a la fracción proveniente del suelo, en PM_{2.5}, cuya fracción de suelo es menor, el ¹⁰Be medido es aquel que se adhiere a los componentes como sulfatos y materia orgánica. Esto no es sorprendente si se considera que en el caso de la ZMVM el dióxido de azufre y sulfatos provenientes del corredor industrial Tula-Tepeji, son abundantes (Gómez, y otros, 2016).

6 CONCLUSIONES

- Los experimentos de optimización de corriente con muestras blanco mostraron que durante los procedimientos radioquímicos de obtención de ^{10}Be , al emplear vasos de Teflón se evita la acumulación de isóbaros contaminantes como el ^{10}B . Por lo que no se recomienda usar material de borosilicato.
- En este trabajo por primera vez se cuantificó exitosamente el ^{10}Be presente en el MRC *NIST 1648a*, siguiendo un protocolo radioquímico diferente al reportado en la literatura.
- La intercomparación de las concentraciones de ^{10}Be en el MRC *NIST 1648a* obtenidos con tres metodologías y en dos laboratorios (LEMA y CNA), no mostró diferencias significativas, ya que las concentraciones de ^{10}Be mantuvieron el mismo orden de magnitud con variaciones menores. Por lo que se demostró que el método implementado para muestras naturales es reproducible.
- El empleo de tres resinas tiene como consecuencia una pérdida de un 25% de berilio entre la segunda y tercera resina. Sin embargo, para el estudio de los filtros de aerosoles el empleo de la tercera columna fue necesario para eliminar elementos mayores como el Ca^{2+} que interfiere en la precipitación del ^{10}Be . Esta pérdida no impide la obtención de concentraciones comparables con las reportadas en la literatura y del mismo orden de magnitud en latitudes similares.
- La alta sensibilidad de la técnica AMS permitió la detección de ^{10}Be en filtros de aerosoles atmosféricos y en particular en $\text{PM}_{2.5}$.
- La concentración de ^{10}Be en $\text{PM}_{2.5}$ mostró una variación temporal en la temporada de muestreo.
- Las concentraciones de ^{10}Be en $\text{PM}_{2.5}$ y en filtros de PM_{10} obtenidas en una campaña anterior, son del mismo orden de magnitud a pesar del tamaño de partícula. Estos resultados confirman la alta afinidad de ^{10}Be a las partículas menores que $2.5\ \mu\text{m}$, debido a sus componentes orgánicos y sulfurados.

7 REFERENCIAS

- REDAIRE. (Red de Vigilancia de la calidad del aire). (2012). *Protocolo para muestreo de partículas respirables (PM10) utilizando el equipo muestreador de alto volumen PM10 de flujo constante.*
- (UCAR), U. C. (2015). Center for Science Education. *Layers of Earth's Atmosphere.* Boulder, Colorado, United States of America.
- ANGEL I., E. C. (2013). Geocronología con el Isótopo ^{10}Be , aplicación para el estudio de la Dinámica Glaciar Cuaternaria en la Región Central de los Andes de Mérida. *Geos*, 44, 73-82.
- Aragón, J. (2018). CORRECIÓN NUMÉRICA DE LOS DATOS DE ^{14}C POR ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACELERADORES: ESTUDIO DE AEROSOLES ATMOSFÉRICOS. *Tesis de Maestría.* CDMX, UNAM, México.
- Arrieta-Fuentes, A. (2016). Dispersión de material particulado (PM10), con Interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16, 43-54.
- Balco, G. (2006). *Converting Al and Be isotopoe ratio measurements to nuclide concentrations in quartz.* University of Washington, USA: Cosmogenic Nuclide Lab.

- Beer, J., McCracken, K., & von Steiger, R. (2012). *Cosmogenic Radionuclides. Theory and Applications in the Terrestrial and Space environments*. New York: Springer.
- Brook, J. R. (1997). The Relationship Among TSP, PM10, PM2.5, and Inorganic Constituents of Atmospheric Particulate Matter at Multiple Canadian Locations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2-19.
- Chen, P. Y. (2017). Comparison of measurement and modeling results of the global ^{10}Be flux in topsoil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 311(3), 2039–2045.
- Chow, J. C. (2002). Chemical composition of PM2.5 and PM10 in Mexico City during winter 1997. *Science of The Total Environment*, 287(3), 177–201.
- Coughlan, G. D., Dodd, J. E., & Griparios, B. M. (2006). *The Ideas of Particle Physics: An Introduction for Scientists* (3rd Edition ed.). Cambridge University Press.
- David, J.-C., & Leya, I. (2019). Spallation, cosmic rays, meteorites, and planetology. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 109(103711), 55pp.
- Estupiñán López, A. F., Nunez, L., & Asorey, H. (2015). Metodo de Thinning y Dethinning para lluvias de primarios con alta energía. *ResearchGate*, 167 pp.
- FRIEDLANDER, S. K. (1994). Revising the Particulate Ambient Air Quality Standard. *Environmental Science & Technology*, 28(3), 148A–150A.

- Gaitán, K. (2018). Caracterización de un sistema AMS para la obtención de radioisótopos cosmogénicos en aerosoles. *MrC. Thesis*. Ciudad de México, México: IFUNAM,UNAM.
- Gary W. vanLoon, S. J. (2018). *Environmental Chemistry: A global perspective*. New York: Oxford University Press.
- Gómez, V., Solís, C., Chávez, E., Andrade, E., Ortiz, M. E., Huerta, A., . . . Ortiz, E. (2016). ¹⁴C content in aerosols in Mexico City. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* , 365-369.
- González, C. A., & Watters, R. L. (2011). Certificate of Analysis. Standard Reference Material 1648a. Urban Particulate Matter. *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation*. CromLab S.L. National Institute of Standards and Technology, United States of America: Department of Commerce.
- Halzen, F. a. (1984). *Quarks and leptons: An introductory course in modern particle physics*. Printed in United States of America: Wiley; Edición: 1st (20 de enero de 1984).
- Harris, D. (1991). *Análisis químico cuantitativo*. México, D.F.: Grupo Editorial Iberoamérica, S.A.
- Haungs, A. (2009). *Experimental High-Energy Astroparticle Physics*. Morelia, México: Vortrag.

HOFMANN, H., BEER, J., BONANI, G., VON GUNTEN, H., RAMAN, S., SUTER, M., . . .

WOLFL, W. a. (1987). ^{10}Be : Half-life and AMS-standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 29(1-2), 32-36.

Hong Zhuang, C. K. (1999). Size distributions of particulate sulfate, nitrate, and ammonium at a coastal site in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 33(6), 843—853.

Hsu YM, W. X. (1995). Collocated comparisons of continuous and filter-based PM_{2.5} measurements at Fort McMurray, Alberta, Canada. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 329-339.

Hughes, I. S. (1991). *Elementary Particles* (3rd Revised edition ed.). Great Britain: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

Jane K. Willenbring, F. v. (2009). Meteoric cosmogenic Beryllium-10 adsorbed to river sediment and soil: Applications for Earth-surface dynamics. (E. B.V, Ed.) *Earth-Science Reviews*, 105–122.

Jaúregui, E. (1989). The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology*, 169-180.

- Jaúregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo período del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas. *Boletín 31 de Investigaciones geográficas*, 9-44. Instituto de Geografía/UNAM, México: 9-44.
- Jaúregui, E. (1998). Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. *Atmosfera*, 131-140.
- K. S. Carslaw, R. G. (2002). Cosmic Rays, Clouds, and Climate. *Science*, 298(5599), pp. 1732-1737.
- Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. Ltd: John Wiley & Sons.
- Luis C. Angulo, J. I. (2011). Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto. *Información Tecnológica*, 22, 23-24.
- Marino, D. (2011). Estudio teórico experimental sobre respuestas biológicas a compuestos orgánicos de relevancia ambiental. *Universidad Nacional de La Plata. Tesis de doctorado*, 204 pp.
- McDowell, J. (07 de 2018). The edge of space: Revisiting the Karman Line. *Acta Astronautica*, 151.
- McHargue, L. R. (1991). The global beryllium 10 cycle. *Reviews of Geophysics*, 29(2), 141.

Méndez García, C., Padilla, S., Solís, C., De los Ríos, K., Chávez, E., García, R., . . . Huerta, A. (2019). Meteoric ^{10}Be concentrations in the center of Mexico. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.

Méndez, C. G. (febrero de 2015). ESTUDIO DE RADIOISÓTOPOS PRESENTES EN AEROSOLES DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *PROPUESTA DE PROYECTO PARA ESTANCIA POSTDOCTORAL*. Ciudad de México, IFUNAM. UNAM, México.

Miller, J. N., & Miller, J. C. (2002). *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.S.A.

Miranda, J. Z. (2004). The possible influence of volcanic emissions on atmospheric aerosols in the city of Colima, Mexico. . *Environmental Pollution*, 127: 271-279.

Moya, M. C. (2003). Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City. Atmospheric Environment. *Atmospheric Environment*, 37, 3581-3591.

Naturales, S. d. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}*. Delegación Coyoacán, México, D.F. : Instituto Nacional de Ecología.

Nevers, N. d. (1998). *INGENIERIA DE CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AIRE*. México: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE MEXICO.

- Nishiizumi, K., Imamura, M., W. Caffee, M., Southon, J., Finkel, R., & McAninch, J. (2007). Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms(NIMB)*, 403-413.
- Otaola, J., Mendoza, B., & Pérez, R. (2013). *El Sol y la Tierra: Una relación tormentosa*. Mexico,D.F: FCE - Fondo de Cultura Económica.
- Padilla, S. (2015). Medidas de ^{10}Be y ^{26}Al en Espectrometría de Masas con Acelerador de Baja Energía en el Centro Nacional de Aceleradores. *PhD Thesis*. Sevilla, España: Departamento de Física Atómica Molecular y Nuclear, CNA.
- Padilla, S. (2 de Diciembre de 2016). Medidas de ^{26}Al y ^{10}Be en Espectrometría de Masas con Acelerador de Baja Energía, SARA. CDMX, México, UNAM: Instituto de Física. Presentación.
- Powell, M. R. (2014). *Science at EPA:Information in the Regulatory Process*. Danvers,MA,USA: Routledge.
- Raga, G. K. (1999). Evidence for volcanic influence on Mexico City aerosols. *Geophysical Research Letters*, 26, 1149-1152.
- Reiners, P. W., Carlson, R. W., Renne, P. R., Cooper, K. M., Granger, D. E., McLean, N. M., & Schoene, B. (2018). *Geochronology and Thermochronology*. Printed in the United States of America: John Wiley & Sons Ltd.

- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., & Kakaliagou, O. (2001). Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*, 2433-2447.
- Rozanski, K. F. (1996). Boletín de la Organización Internacional de Energía Atómica. *La radiactividad y las ciencias geológicas: Comprensión del medio natural*, 38(2), 9-16. Viena, Austria.
- Ruiz, G. A. (2012). Determinación de ^{10}Be mediante Espectrometría de Masas con Aceleradores de Baja Energía. *Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear*. Sevilla, España.
- Solís Rosales, C., & Martínez Carrillo, M. (2013). II Taller del Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores del Instituto de Física. UNAM. *El nuevo Laboratorio de Espectrometría de masas con aceleradores (LEMA) en el IFUNAM* (pág. 13 pp.). Ciudad de México, México: UNAM.
- SUÁREZ, C. A. (2012). DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10. *Luna Azul*, 1909-2474.
- Vedal, S. (1997). Ambient Particles and Health: Lines that Divide. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 551-581.

Wagner, T., & Stellino, A. I. (1996). *Contaminación, causas y efectos*. D.F: Gernika, México.

Young, G. E. (2001). Accelerator mass spectrometry (AMS): recent experience of its use in a clinical study and the potential future of the technique. *Xenobiotica*, 31(8-9), 619–632.