



SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN AMBIENTAL

**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN MONITOREO Y CARACTERIZACIÓN
DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS**

Informe Final

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CONCENTRACIONES DE
PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS ENTRE LAS REGIONES CENTRO,
NORTE Y SUR, Y ORIENTE Y PONIENTE DE LA ZMVM, MEDIANTE
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y MICROANÁLISIS
ELEMENTAL POR ESPECTROMETRÍA DE
RAYOS X”**

Responsable: Dr. José David Sepúlveda Sánchez

Diciembre del 2002

1. Introducción	4
1. Introducción	4
2. Antecedentes del estudio	4
3. Objetivos	6
4. Método	7
4.1. DATOS DE LAS MUESTRAS E INSTRUMENTOS	7
4.1.1. Muestras	7
4.1.2. Instrumentos	7
4.1.2.1. Microscopio Electrónico de Barrido	8
4.1.2.2. Espectrómetro de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)	8
4.2. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL	9
5. Resultados	9
5.1. ANÁLISIS MORFOLÓGICO	10
5.2. ANÁLISIS QUÍMICO	12
5.3. RELACIÓN ENTRE COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	19
6. Discusión	20
7. Conclusiones	21
8. Recomendaciones para estudios futuros	22
9. Referencias Bibliográficas	23

LISTA DE TABLAS

TABLA NO. 1: TOTAL DE PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS CONTADAS SEGÚN GRUPOS.	10
TABLA NO.2: DISTRIBUCIÓN DEL TOTAL DE PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS SEGÚN REGIONES Y GRUPOS.	10
TABLA NO. 3: TOTAL DE PARTÍCULAS SELECCIONADAS SEGÚN TAMAÑO.	11
TABLA NO. 4: DISTRIBUCIÓN DEL TOTAL DE PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS SELECCIONADAS SEGÚN REGIONES Y TAMAÑO.	12
TABLA NO. 5. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE ELEMENTOS QUÍMICOS SEGÚN GRUPO DE PARTÍCULAS.	13
TABLA NO. 6. RELACIÓN ENTRE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS.	20

LISTA DE ILUSTRACIONES

GRÁFICO NO. 1: TOTAL DE PARTÍCULAS SELECCIONADAS SEGÚN TAMAÑO.	11
GRÁFICO NO. 2: DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS SELECCIONADAS SEGÚN REGIONES Y TAMAÑO.	12
GRÁFICO NO. 3: DISTRIBUCIÓN DE LA FRECUENCIA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN LAS PARTÍCULAS PM10.	15
GRÁFICO NO. 4: DISTRIBUCIÓN DE LA FRECUENCIA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN LAS PARTÍCULAS PM2.5.	16
GRÁFICO NO. 5: DISTRIBUCIÓN DE LA FRECUENCIA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN LAS PARTÍCULAS PM1.	17
GRÁFICO NO. 6: DISTRIBUCIÓN DE LA FRECUENCIA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS SEGÚN TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS.	¡Error! Marcador no definido.

1. Introducción

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), también llamada Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) es una megaciudad con una población de más de 18 millones de habitantes. Representa el área de concentración con más problemas ambientales de nuestro país, debido al uso de más de 3.5 millones de vehículos con motores de combustión interna, una actividad industrial importante, y el uso de grandes cantidades de combustibles domésticos como el gas LP.

Una de las principales formas de contaminantes atmosféricos son las partículas suspendidas, y de ellas, la fracción denominada PM10, la cual representa el mayor peligro, en especial las partículas más finas como la fracción PM2.5.

La realización de encuestas de población y el comportamiento de los Índices de Morbilidad en los Servicios de Urgencias y Consulta Externa de las instituciones del sector salud, durante los episodios de aumento de la concentración de PM10 en la atmósfera, demuestran una relación con la aparición y severidad de síntomas como ardor de ojos y garganta, disnea, tos, entre otros, y enfermedades respiratorias agudas y crónicas tales como bronquitis, asma y enfisema pulmonar. (Olaiz, G., 2000)

Hay que destacar que además del incremento en las tasas de morbilidad aumenta la mortalidad en los grupos de alto riesgo, fundamentalmente ancianos, niños pequeños y personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias e inmunodeprimidas. (Corey, OG., 1995; OPS, 1996)

Las PM10, es decir todas las partículas menores a 10μ , por sus dimensiones y formas, tienden a penetrar más profundamente en las vías respiratorias e interactuar en la superficie de ellas. Diferentes características morfológicas de las partículas, como tamaño, textura y elasticidad, y químicas, como reactividad superficial y solubilidad, aunadas a las características de las vías respiratorias, facilitan la retención o eliminación de las referidas partículas en el organismo. (Gehr P., Heyder J. 1998)

La naturaleza de las PM10, debido a las características antes descritas, es muy variada e incluye una amplia gama de formas y tamaños que es necesario conocer para comprender su relación con el desarrollo de las enfermedades y la muerte por estas causas. Especialmente importantes son las partículas de la fracción PM2.5, que por sus características aerodinámicas pueden penetrar más profundamente en el sistema respiratorio.

Para el estudio de estas partículas se requiere la utilización de la Microscopía Electrónica de Barrido con un sistema acoplado de microanálisis espectral de Rayos X, al posibilitar la identificación morfológica y química, incluso de aquellas de tamaño de hasta 100 nm (0.1μ).

2. Antecedentes del estudio

En el año de 1999 se puso en operación en el CENICA un equipo de Microscopía Electrónica de Barrido y Emisión Secundaria con una sonda para Microespectrometría de

Rayos X, para el análisis de la composición química, por elementos, de los diferentes materiales en estudio.

Con la implementación de esta tecnología, el CENICA ha establecido una línea de investigación en el área de Calidad del Aire con el estudio de muestras provenientes de diversos sitios de monitoreo atmosférico para partículas suspendidas. Durante el año 2000, se realizó un proyecto piloto que se denominó “ANÁLISIS DE MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS DE ORÍGENES DIVERSOS EN DIFERENTES ÁREAS DEL TERRITORIO NACIONAL”. Entre estas áreas estaban el estado de Morelos, Baja California Norte (zona de Tijuana), y regiones de la ZMVM, y de manera especial, la estación de monitoreo que el CENICA tiene en sus instalaciones en el campus de la UAM Iztapalapa. (Sepúlveda JD., 2000)

En este primer estudio se establecieron las bases de la metodología para estudiar partículas provenientes de muestras obtenidas con equipos de alto volumen o equipos portátiles tipo “minivol” en exteriores e interiores, y fueron utilizadas como “matrices” filtros de teflón y de fibras de vidrio o cuarzo. Las muestras incluyeron los 4 trimestres del año y los resultados del análisis nos permitieron apreciar que las partículas mayores a 10μ estaban presentes en un 49 por ciento, seguidas del grupo de partículas entre 10μ y 2.5μ , con 28.4 por ciento, y del grupo de partículas menores a 2.5μ , con el 22.6 por ciento. De la variación encontrada en la composición elemental de las diferentes partículas, pero también de las coincidencias morfológicas y de composición química, se concluyó la necesidad de aumentar el número de muestras, circunscribiendo el estudio a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Para el año 2001, se implementó el estudio denominado “CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y MICROANÁLISIS DE RAYOS X, EN MUESTRAS PROVENIENTES DE 5 ESTACIONES DE LA RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO”. (Sepúlveda JD, 2001) Se diseñó el estudio longitudinal con muestras que comprendieron los 12 meses del año, y que provenían de estaciones de monitoreo de las 5 regiones en que se ha dividido estratégicamente a la ZMVM para efecto de evaluación de la calidad del aire, todas ellas pertenecientes a la Red Manual del Sistema de Monitoreo Atmosférico (REDMA), y correspondientes a la estación XALOSTOC (XAL) en la región noreste, estación CERRO DE LA ESTRELLA (CES), representando la región sureste, estación MERCED (MER), de la región centro, estación PEDREGAL (PED) al suroeste y estación TLALNEPANTLA (TLA) en la región noroeste. En el estudio del año 2001 se analizaron muestras de fragmentos representativos de 120 filtros de los sistemas de monitoreo de alto volumen, fracción PM₁₀, de dos fechas quincenales de cada mes del año, es decir, 10 filtros por cada mes.

En los resultados del análisis morfológico se encontró que el mayor número de partículas correspondió a las muestras provenientes de la estación XALOSTOC (XAL), situada en la

región NORESTE. Asimismo, en dichas muestras se encontró la mayor variedad de partículas, tanto las interpretadas como antropogénicas, como las naturales. También se encontró en ese entonces que es en los meses de enero y febrero cuando en XALOSTOC existe mayor número de partículas captadas en el sistema de monitoreo, lo que correspondería a la época seca-fría. Por otra parte, el estudio indicó que es en la región SUROESTE, representada por la estación PEDREGAL (PED), donde se colectó el menor número de partículas.

Los resultados del análisis morfológico y químico permiten establecer una relación de los tipos de partículas características con el entorno y el uso de suelo. Sin embargo, falta mucha más investigación y de forma más intencionada para conocer las características peculiares de cada tipo de partícula y su origen.

En este sentido se planteó la necesidad de profundizar en el estudio de las partículas suspendidas originadas por las actividades humanas, es decir, las denominadas antropogénicas, para comparar las características químicas y morfológicas entre las partículas PM10, PM2.5 y PM1, y establecer, en caso de existir, las diferencias entre las partículas de las diferentes regiones, y tratar de establecer una correlación entre la composición y la morfología de los 3 grupos de partículas.

3. Objetivos

1. Comparar las características químicas y morfológicas entre partículas antropogénicas PM10, PM2.5 y PM1.
2. Establecer las diferencias entre las partículas antropogénicas de las diferentes regiones de la Zona Metropolitana del Valle de México.
3. Relacionar la composición química con las características morfológicas de las PM10, PM2.5 y PM1.

4. Método

4.1. DATOS DE LAS MUESTRAS E INSTRUMENTOS

4.1.1. Muestras

Fueron seleccionados 120 filtros de fibra de cuarzo, provenientes de muestreadores operados por la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) en modalidad de captación para la fracción PM10, de 5 estaciones de monitoreo atmosférico, cada una de las cuales representa una de las 5 regiones en que se divide la ZMVM, y en 2 fechas por mes (una cada quincena) de los 12 meses del año. Estos filtros fueron proporcionados por la Red de Monitoreo Atmosférico del Gobierno del Distrito Federal.

Con la finalidad de verificar la distribución por región, se seleccionaron las siguientes estaciones como sitios representativos:

Del Noreste: XALOSTOC (XAL)
Del Sureste: CERRO DE LA ESTRELLA (CES)
Del Centro: MERCED (MER)
Del Noroeste: TLALNEPANTLA (TLA)
Del Suroeste: PEDREGAL (PED)

Las fechas de muestreo fueron de agosto del 2000 a julio del 2001, utilizando equipos de monitoreo de alto volumen que operaron a 1.13 m³/min durante 24 horas consecutivas (de las 0 a las 24 hrs.) Estos equipos son de la marca Andersen provistos de filtros de fibra de cuarzo de 8 x 10 pulgadas. De cada filtro se obtuvo una tira representativa de 2.5 cm de ancho por 25 cm de largo. A cada una se le asignó el número interno de control del área de laboratorios del CENICA.

Basándonos en las experiencias previas, se decidió llevar a cabo el estudio de las muestras mediante el método de transferencia por contacto en la superficie de los portamuestras de aluminio de 10 mm de diámetro, provistos de una película de Carbono conductor doble adhesiva, para uso en Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Se prepararon 2 “probetas” de cada uno de los 120 filtros involucrados, mediante la aplicación, con la menor presión posible, de los cilindros portamuestras en 3 sitios diferentes de la tira de filtro (los extremos y el centro). El control de manufactura se realizó bajo el microscopio estereoscópico, procurando no desprender demasiadas fibras de cuarzo de la superficie del filtro que pudieran causar interferencias en la observación microscópica o el análisis microespectrométrico.

A partir de este momento y hasta su análisis, las muestras se preservaron en un ambiente seco y a temperatura ambiente en un desecador provisto de sílica gel.

4.1.2. Instrumentos

4.1.2.1. Microscopio Electrónico de Barrido

Este estudio fue realizado con un microscopio electrónico de barrido y emisión secundaria (MEB) provisto de control de bajo vacío, de la casa JEOL (Japón), modelo JSM-5900 LV, dotado de una sonda de microespectrometría por energía dispersiva de rayos X (EDS) acoplada, de la casa Oxford (Inglaterra). El funcionamiento del sistema se basa en la posibilidad de emitir rayos catódicos (electrones, radiación β) obtenidos a partir del calentamiento de un filamento de tungsteno (emisión termoiónica) de manera controlada. Estos electrones constituyen una radiación primaria o electrones primarios (haz primario), y se les puede acelerar mediante una diferencia de potencial eléctrico entre el cátodo, que es donde se encuentra conectado el filamento emisor, y el ánodo, que tiene una forma de una placa perforada en su centro.

Los electrones de este emisor (cañón electrónico) son forzados a pasar a través de la perforación del ánodo por la fuerza de atracción del mismo, ya que los electrones poseen una carga eléctrica negativa y el ánodo es positivo por estar conectado a tierra. La diferencia de potencial entre cátodo y ánodo es lo que determina la fuerza de atracción y por lo tanto la velocidad a la que se mueven los electrones. Normalmente se utilizan diferencias de potencial eléctrico entre 1 a 35kV. A mayor diferencia de voltaje, mayor velocidad, y a mayor velocidad, menor longitud de onda de los electrones y mayor potencial de penetración en los materiales de estudio. La radiación obtenida puede ser concentrada y conducida mediante sistemas electromagnéticos para dirigirla de manera controlada hacia la muestra a estudiar y en una modalidad denominada *barrido* electrónico, que consiste en el recorrido, punto por punto, y formando líneas de un área determinada muy pequeña. En el choque de estos electrones primarios sobre la superficie de la muestra, la energía de esta acción de bombardeo, da como resultado la emisión de electrones a partir de la muestra misma, a los que se les denomina electrones secundarios. Estos son captados por detectores especiales para este tipo de energía y conducidos a un sistema intensificador muy parecido al de una cámara de televisión, lo que nos permite la formación de una imagen en un monitor sincronizado con el sistema de barrido del microscopio. La imagen resultante se denomina *imagen de electrones secundarios* y nos proporciona información sobre la topografía superficial, o en el caso de las partículas, sus características morfológicas, es decir, forma, tamaño, textura y aspecto.

Los electrones primarios, después de penetrar superficialmente la muestra, son desviados dependiendo de la naturaleza de la muestra misma, lo que se denomina dispersión electrónica, y estos electrones, denominados también retrodispersos, emergen de la muestra y pueden ser captados por detectores especiales para los mismos, y constituir otra imagen (diferente a la descrita en el caso de los secundarios) que se denomina *imagen de electrones retrodispersos*, que nos permite conocer un poco del interior de la muestra. Esta modalidad de observación es muy importante porque es en ella en la que se hace el análisis con el EDS, ya que la utilización de los detectores para electrones retrodispersos no interfiere en las funciones de la sonda para rayos X.

4.1.2.2. Espectrómetro de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)

Al mismo tiempo, está ocurriendo en el área bombardeada de la muestra, una emisión de fotones de alta energía, es decir, rayos X, a partir de cada elemento constituyente de la misma, de forma tal que existirán tantas variedades de rayos X como elementos existan en el área bombardeada. Por esta razón se les denomina rayos X característicos, los cuales poseen longitud de onda y energía de dispersión específicas. Este tipo de radiación es justamente la que detectan los microespectrómetros de rayos X acoplados al microscopio electrónico, y en nuestro caso, el tipo de detector que fue utilizado para el presente estudio, es un detector para la energía dispersiva de los rayos X característicos, es decir, un EDS.

La operación del sistema se realizó tanto en bajo vacío como en alto vacío, y la observación de las partículas se llevó a cabo en todos los casos con la imagen de electrones secundarios (SEI por sus siglas en inglés) y con la de electrones retrodispersos (BES por sus siglas en inglés) con 5, 10 y 20kV de voltaje de aceleración. El análisis de la constitución química elemental de las partículas seleccionadas fue realizado siempre a 20kV y activada la imagen en electrones retrodispersos.

4.2. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL

En las probetas de cada uno de los 120 filtros se contaron por lo menos 20 partículas, utilizando criterios morfológicos (tamaño, forma y aspecto), observando que las mismas no rebasaran 10μ y que preferentemente presentaran forma redondeada, y en el modo de electrones retrodispersos, mostraran la presencia de uno o más núcleos brillantes en su espesor, lo que generalmente es indicativo de la presencia de metales, y además la presencia de marcadores de combustión y otros elementos considerados como marcadores antropogénicos. Se midió el diámetro y se registró el conteo en tres casilleros diferentes por cada estación. En el primero se contabilizaron las partículas desde 10μ hasta 2.6μ , en el segundo de 2.5μ hasta 1.1μ y en el tercero de 1μ o menos. Se determinó el porcentaje que representaba cada grupo y región del total de partículas estudiadas, denominándolas PM10, PM2.5 y PM1, respectivamente.

Fueron contadas un total de 2400 partículas en las cinco regiones, y de éstas fueron seleccionadas 600 (una de cada cuatro de cada tamaño y de cada estación de monitoreo) utilizando como criterio de selección la imagen obtenida de las partículas que evidenciaba los rasgos morfológicos más claramente, manteniendo la distribución porcentual por cada grupo y región, de manera tal que se garantizara la extrapolación al realizar las siguientes fases de análisis. En todos los casos, la observación microscópica se realizó tanto en la modalidad de electrones secundarios como en la de electrones retrodispersos. En todas las partículas seleccionadas se analizó la composición química elemental y se procedió a agruparlas, relacionando la composición química determinada con la imagen morfológica identificada. El análisis espectrométrico fue realizado a 20kV con el programa ISIS del EDS OXFORD. El tiempo de captura de señal fue ajustado a 60 segundos y con una resolución del sistema de 60eV.

5. Resultados

El total de partículas antropogénicas contadas fue de 2400 y se puso especial énfasis en las muy pequeñas, ya que fue necesario trabajar con amplificaciones mayores a 30,000X

poniendo cuidado en su correcto enfoque para asegurar una medición confiable. Las partículas se clasificaron como antropogénicas atendiendo al criterio morfológico (forma, tamaño y aspecto) y a la presencia de uno o más núcleos brillantes en imagen de electrones retrodispersos.

Del total de partículas antropogénicas, el 49.33% correspondió al grupo PM10, el 37.33% al PM2.5 y el 13.34% al PM1, según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla No. 1: Total de partículas antropogénicas contadas según grupos.

	PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS						TOTAL
	PM 10		PM 2.5		PM 1		
	No.	%	No.	%	No.	%	
TOTAL	1,184	49.33	896	37.33	320	13.34	2 400

5.1. ANÁLISIS MORFOLÓGICO

La distribución de las partículas antropogénicas según las regiones estudiadas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla No.2: Distribución del total de partículas antropogénicas según regiones y grupos.

Regiones	PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS						TOTAL
	PM 10		PM 2.5		PM 1		
	No.	%	No.	%	No.	%	
Noreste (XAL)	402	34	260	29	97	30.3	759
Sureste (CES)	206	17.4	170	19	58	18.2	434
Centro (MER)	197	16.6	152	17	50	15.7	399
Suroeste (PED)	154	13	108	12	36	11.2	298
Noroeste (TLA)	225	19	206	23	79	24.6	510
TOTAL	1184	100	896	100	320	100	2400

El resultado de la selección de partículas, atendiendo el criterio morfológico, se muestra en la tabla No.3 y en el gráfico 1.

Tabla No. 3: Total de partículas seleccionadas según tamaño.

	PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS						TOTAL
	PM 10		PM 2.5		PM 1		
	No.	%	No.	%	No.	%	
TOTAL	296	49.33	224	37.33	80	13.34	600

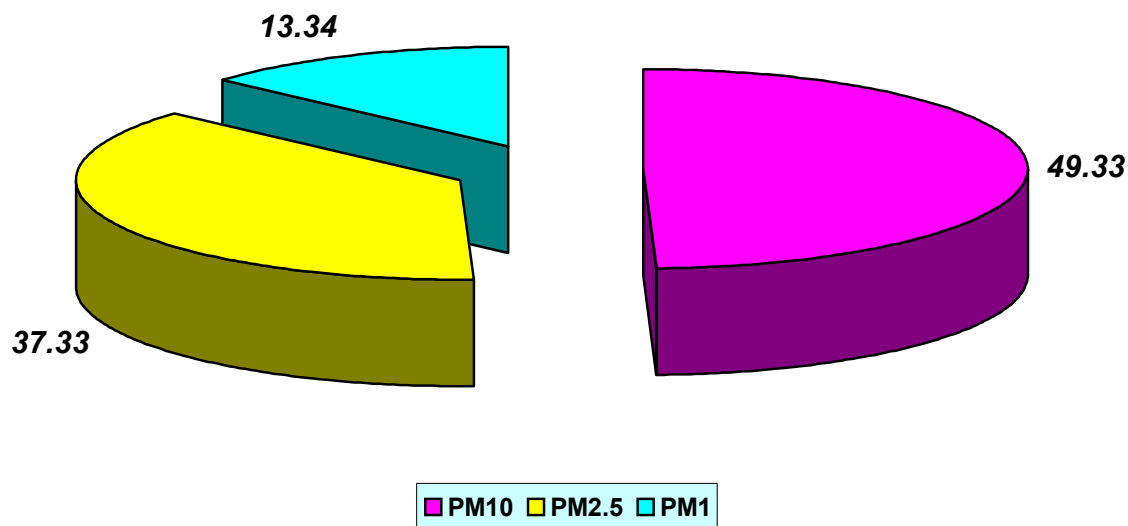


Gráfico No. 1: Total de partículas seleccionadas según tamaño.

Como puede apreciarse en la tabla No.4 y en el gráfico 2, la distribución de las partículas antropogénicas por grupo y región muestran una mayor concentración en la estación de Xalostoc (noreste) para todos los grupos, encontrándose las menores concentraciones en el Pedregal (suroeste).

Tabla No. 4: Distribución del total de partículas antropogénicas seleccionadas según regiones y tamaño.

Regiones	PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS					
	PM 10		PM 2.5		PM 1	
	No.	%	No.	%	No.	%
Noreste (XAL)	100	34	65	29	24	30.3
Sureste (CES)	52	17.4	43	19	15	18.2
Centro (MER)	49	16.6	38	17	13	15.7
Suroeste (PED)	39	13	27	12	9	11.2
Noroeste (TLA)	56	19	51	23	19	24.6
TOTAL	296	100	224	100	80	100

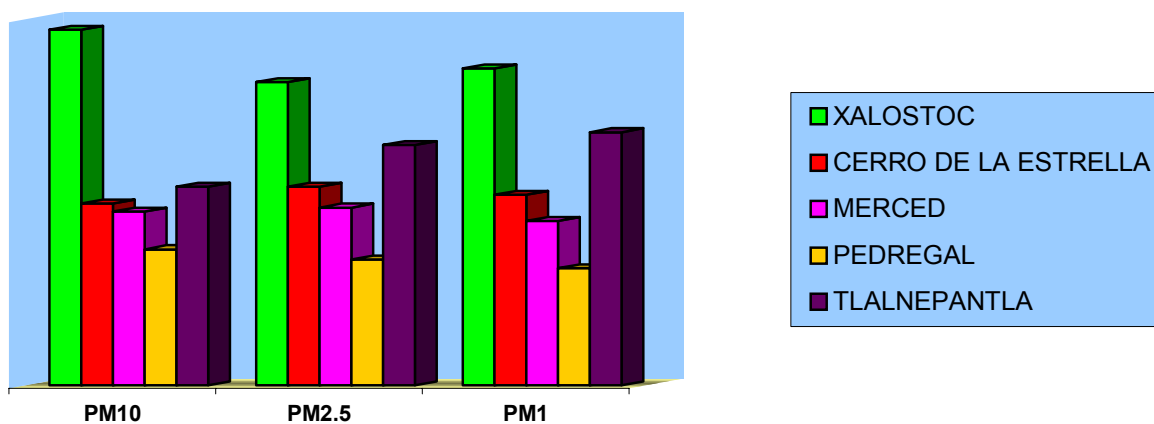


Gráfico No. 2: Distribución de partículas seleccionadas según regiones y tamaño.

5.2. ANÁLISIS QUÍMICO

En las 600 partículas seleccionadas, el análisis químico evidenció la presencia de Carbono (C) en todas las muestras de cada uno de los 3 grupos, pero si tomamos en cuenta que el tamaño de las partículas es menor a 10 μm , y que éstas se encuentran sobre una matriz de Carbono conductivo, el método utilizado no permite discriminar cuánto de este elemento corresponde a la partícula y cuánto a la matriz.

Al analizar la distribución de frecuencia de los elementos químicos en las partículas estudiadas, se encontró que la mayor frecuencia correspondió al Oxígeno con 99.83%, seguido del Sílice con 99.16%. La menor frecuencia correspondió al Rubidio, Cobalto, Rutenio y Wolframio, con 0.33% cada uno. Los elementos que mantuvieron una frecuencia elevada (mayor a 50%) en los 3 grupos de partículas, fueron el Sodio, el Aluminio, el Azufre, el Potasio, el Calcio y el Hierro, según se muestra en la Tabla No. 5. Con una menor frecuencia le siguió el Cobre con 41.89% en las PM10, y 49.55% en las PM2.5. Sin embargo, en las PM1 su frecuencia fue mayor al alcanzar el 70%. En el resto de los elementos detectados se encontraron diferencias entre los 3 grupos. Se destaca por su rareza el hallazgo de una partícula de cristales agregados con alto contenido de Plata. En los gráficos 3 a 6 se representa la distribución de frecuencia de elementos químicos en los 3 tamaños de partículas.

Tabla No. 5. Distribución de frecuencia de elementos químicos según grupo de partículas.

ELEMENTO	PM10		PM2.5		PM1		TOTAL	
	No. de partículas	%	No. de partículas	%	No. de partículas	%	No. de partículas	%
C	296	100	224	100	80	100	600	100
O	295	99.6	224	100	80	100	599	99.8
Na	244	82.4	182	81.2	53	66.2	479	79.8
Mg	47	15.8	100	44.6	33	41.2	180	30
Al	257	86.8	200	89.2	62	77.5	519	86.5
Si	291	98.3	224	100	80	100	595	99.1
P	75	25.3	47	20.9	20	25	142	23.6
S	215	72.6	140	62.5	58	72.5	413	68.8
Cl	44	14.8	22	9.8	7	8.7	73	12.1
K	178	60.1	117	52.2	44	55	339	56.5
Ca	213	71.9	164	73.2	64	80	441	73.5
Ti	218	73.6	48	21.4	7	8.7	273	45.5
V	11	3.7	2	0.8	0	0	13	2.1
Cr	27	9.1	11	4.9	9	11.2	47	7.8
Mn	11	3.7	36	16.0	18	22.5	65	10.8
Fe	180	60.8	171	76.3	53	66.2	404	67.3
Co	0	0	0	0	2	2.5	2	0.3
Ni	0	0	4	1.7	0	4	4	0.6
Cu	124	41.8	111	49.5	56	70	291	48.5
Zn	47	15.8	62	27.6	20	25	129	21.5
Br	27	9.1	18	8.0	13	16.2	58	9.66
Rb	0	0	0	0	2	2.5	2	0.3
Sr	2	0.6	4	1.7	0	0	6	1

Continuación Tabla No. 5

ELEMENTO	PM10		PM2.5		PM1		TOTAL	
	No. de partículas	%	No. de partículas	%	No. de partículas	%	No. de partículas	%
Zr	2	0.6	7	3.1	0	0	9	1.5
Mo	22	7.4	29	12.9	9	11.2	60	10
Ru	2	0.6	0	0	0	0	2	0.3
Ag	1	0.3	0	0	0	0	1	0.1
In	2	0.6	2	0.8	2	2.5	6	1
Sb	0	0	0	0	4	5	4	0.6
Ba	31	10.4	42	18.7	20	25	93	15.5
W	0	0	0	0	2	2.5	2	0.3
Re	4	1.3	7	3.12	0	0	11	1.8
Pb	22	7.4	0	0	4	5	26	4.3
Dy	0	0	0	0	11	13.7	11	1.8
TOTAL	296		224		80		600	

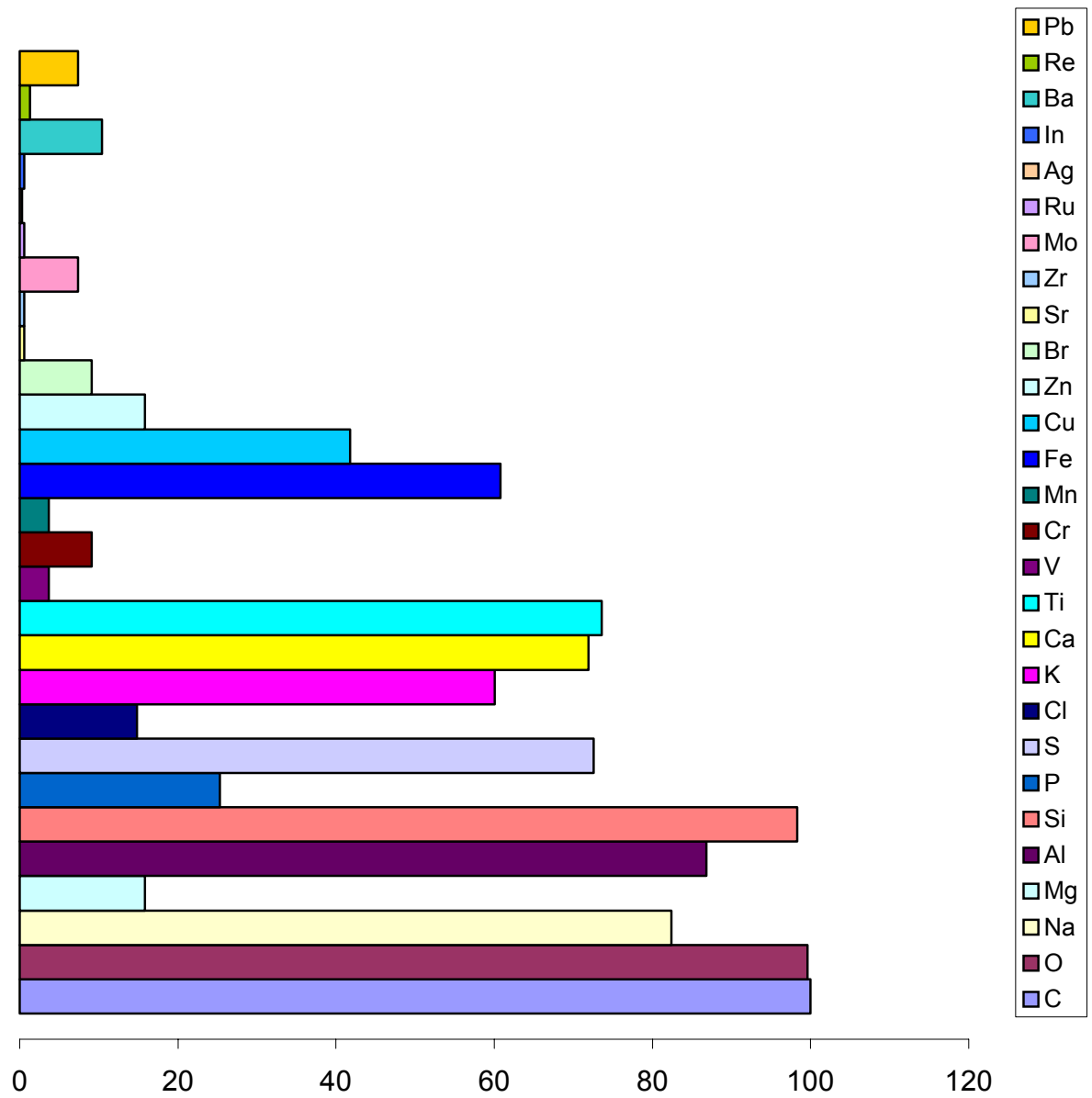


Gráfico No. 3: Distribución de la frecuencia de los elementos químicos en las partículas PM10.

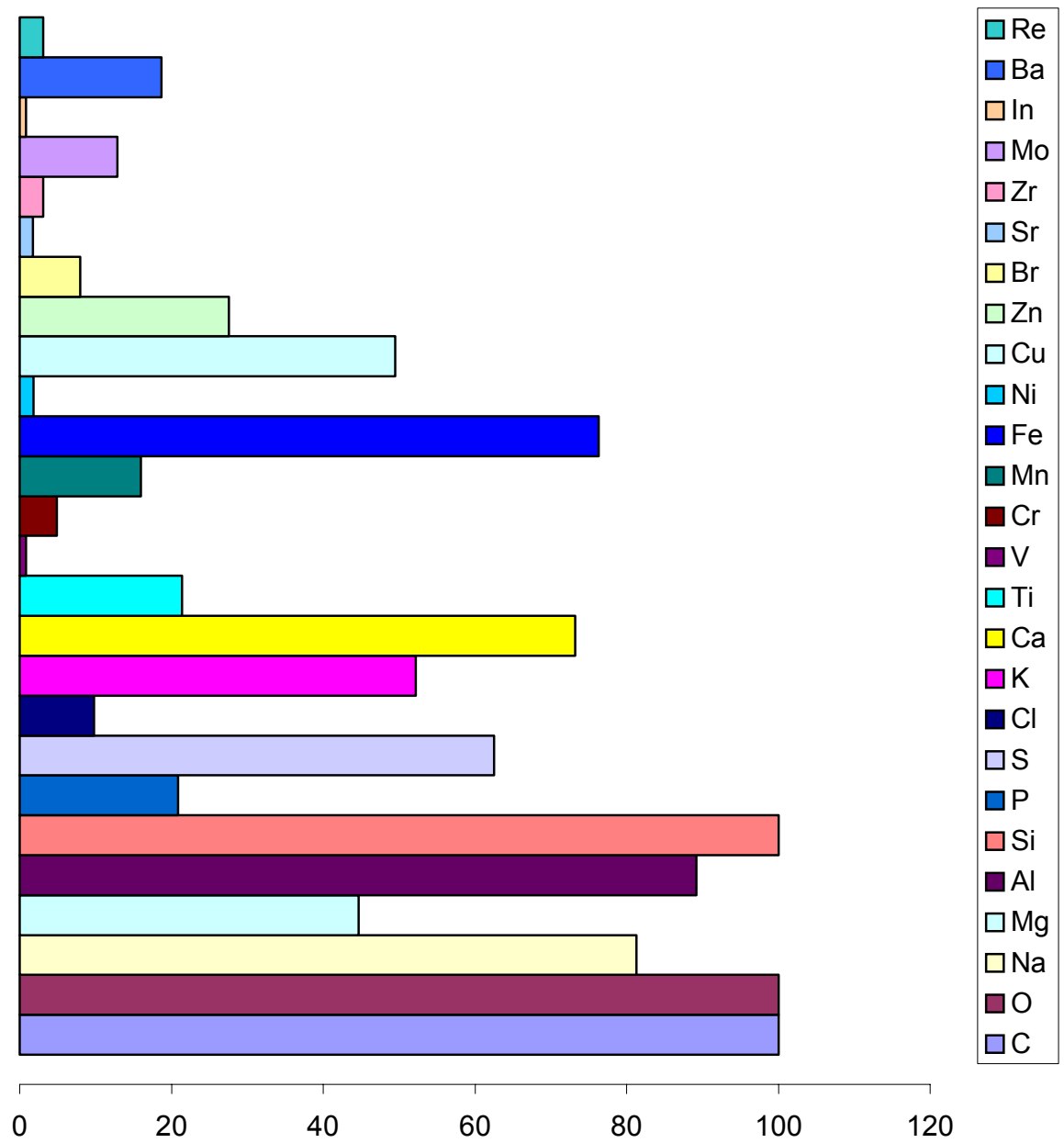


Gráfico No. 4: Distribución de la frecuencia de los elementos químicos en las partículas PM2.5.

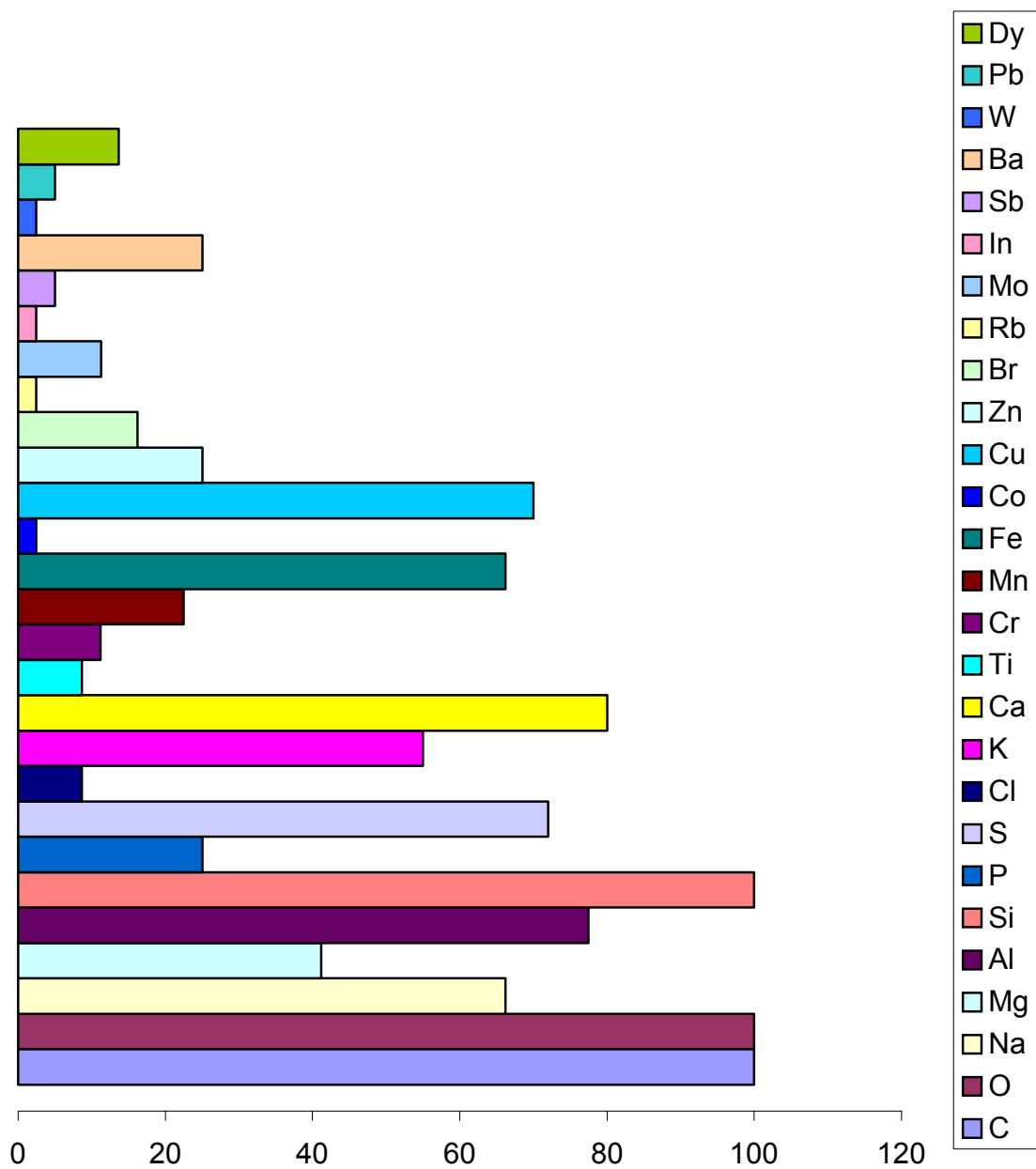


Gráfico No. 5: Distribución de la frecuencia de los elementos químicos en las partículas PM1

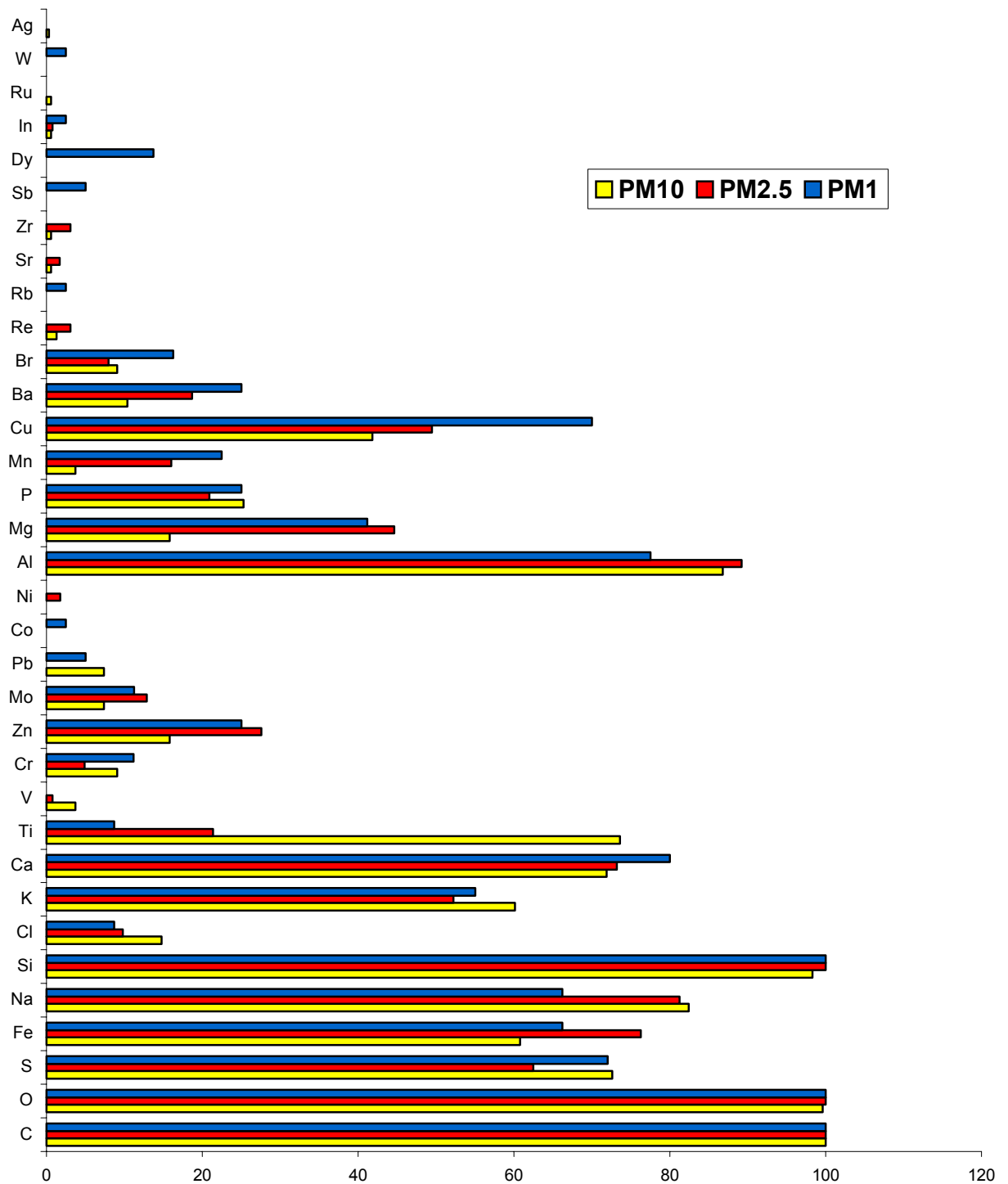


Gráfico No. 6: Distribución de la frecuencia de los elementos químicos según tamaño de las partículas.

5.3. RELACIÓN ENTRE COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Al analizar los resultados químicos determinados en las diferentes partículas antropogénicas, se observó que la morfología de las mismas se relacionaba con la presencia de elementos químicos específicos, según referimos a continuación. Las micrografías y espectros de composición química se han agrupado de igual forma y se incluyen en los anexos correspondientes.

- Las partículas PM10 de forma redondeada con aspecto multiporoso se relacionan con la presencia de Carbono, Oxígeno, Azufre y Vanadio principalmente y con concentraciones mínimas y variadas de otros elementos. Fueron encontradas en muestras provenientes de las 5 regiones.
- Las partículas PM10 de forma irregular con aspecto de cristales y agujas se relacionan con la presencia de Carbono, Oxígeno, y un alto contenido de Azufre y Calcio. Se pudieron apreciar principalmente en muestras provenientes de Pedregal, Tlalnepantla, Xalostoc y Cerro de la Estrella.
- En los tres tamaños de partículas, la forma muy redondeada y con un aspecto homogéneo se relacionó con la presencia de alto contenido de Carbono, Oxígeno, Aluminio, Sílice, Fósforo y Calcio. Además se encontraron otros metales como Hierro y Cobre en menor cantidad. Se encontraron principalmente en muestras provenientes de Xalostoc, Tlalnepantla y Cerro de la Estrella.
- Las partículas PM10 y PM2.5, de forma redondeada, con aspecto de matriz oscura y multitud de pequeñas micropartículas muy brillantes en su se relacionaron con la presencia de altos contenidos de Carbono, Oxígeno y Titanio, y escaso contenido de otros elementos como el Sílice, Aluminio, Cobre, Sodio, Magnesio, Bario y Azufre. Este tipo de partículas se encontró en las muestras provenientes de las estaciones Xalostoc, Tlalnepantla, Cerro de la Estrella y Pedregal.
- Las partículas PM10 de forma redondeada y aspecto acordonado se relacionaron con la presencia de altos contenidos de Hierro y Oxígeno. Este tipo de partículas fue observado en muestras provenientes de Xalostoc, Tlalnepantla y Pedregal.
- Las partículas PM10 de forma redondeada y con aspecto se relacionaron con alto contenido de Carbono y Oxígeno, y escaso contenido de elementos como Sílice, Azufre, Molibdeno, Manganeso Aluminio y Calcio. Principalmente fueron observadas en las muestras provenientes de Xalostoc.
- Las partículas PM10 y PM2.5 de forma muy redonda y aspecto muy homogéneo y oscuro se relacionaron también con alto contenido de Carbono y Oxígeno, y escasa cantidad de Sílice, Potasio, Calcio, Sodio, Aluminio, Hierro, Molibdeno, Bromo y Azufre.

Este tipo de partículas se encontró principalmente en muestras provenientes de Xalostoc, Tlalnepantla y Pedregal.

- En los tres tamaños de partículas de formas variadas, entre ovoides y semirredondas, y de aspecto muy brillante se encontró relación con la presencia de metales tales como Hierro y Cobre en concentraciones muy significativas, además del Carbono y el Oxígeno. Se encontraron en Xalostoc, Tlalnepantla, Pedregal y Cerro de la Estrella.

La tabla No. 6 permite apreciar la relación entre la morfología y la composición química en los diferentes grupos de partículas antropogénicas, así como los sitios de localización.

Tabla No. 6. Relación entre características morfológicas y composición química de las partículas antropogénicas.

Grupos	Características Morfológicas	Composición Química	Estaciones de Monitoreo
Grupo A (PM10)	Forma redondeada. Aspecto multiporoso.	Carbono, Oxígeno, Azufre y Vanadio principalmente.	XAL, CES, MER, PED y TLA
Grupo B (PM10)	Forma irregular. Aspecto de cristales y agujas.	Carbono, Oxígeno y alto contenido de Azufre y Calcio.	PED, TLA, XAL y CES
Grupo C (PM10, PM2.5, PM1)	Forma muy redondeada. Aspecto homogéneo.	Carbono y Oxígeno principalmente, con alto contenido de Aluminio, Sílice, Fósforo y Calcio, y escasa cantidad de metales como Hierro y Cobre.	XAL, TLA y CES
Grupo D (PM10 y PM2.5)	Forma redondeada. Aspecto de matriz oscura y multitud de pequeñas micropartículas muy brillantes en su interior.	Alto contenido de Carbono, Oxígeno y Titanio, y escaso contenido de Sílice, Aluminio, Cobre, Sodio, Magnesio, Bario y Azufre.	XAL, TLA, CES y PED
Grupo E (PM10)	Forma redondeada. Aspecto acordonado.	Alto contenido de Hierro y Oxígeno.	XAL, TLA y PED
Grupo F (PM10)	Forma redondeada. Aspecto grumoso.	Alto contenido de Carbono y Oxígeno y escaso contenido de otros marcadores antropogénicos.	XAL
Grupo G (PM10 y PM 2.5)	Forma muy redonda. Aspecto homogéneo y obscuro.	Alto contenido de Carbono y Oxígeno y escasa cantidad de otros marcadores antropogénicos.	XAL, TLA y PED
Grupo H (PM10, PM2.5, PM1)	Formas variadas entre ovoides y semirredondas. Aspecto muy brillante.	Metales como Hierro y Cobre en concentración significativa, además de Carbono y Oxígeno.	PED, TLA, XAL y CES

6. Discusión

La finalidad de utilizar la técnica descrita es obtener la disposición de las partículas en la superficie adhesiva del Carbono conductor como una capa simple, y de esta manera facilitar el estudio de las características morfológicas de cada partícula con resolución de calidad adecuada y, al mismo tiempo, el análisis espectrométrico, para determinar su constitución elemental con un alto grado de exactitud.

Otra ventaja adicional de tener “fijas” a las partículas es la de posicionarlas mediante el sistema automático del microscopio, para encontrarlas cuantas veces sea necesario,

modificando las condiciones de observación, como voltaje de aceleración, modalidad de alto o bajo vacío, y así comparar los resultados de cada condición y corroborar en su caso la calidad del análisis.

Al comparar las características químicas y morfológicas entre partículas antropogénicas PM10, PM2.5 y PM1, se encontró que entre las PM10 y las PM2.5, de forma y aspecto similar, existe semejanza en su composición química, lo que nos indica que en su génesis sustancias similares adquieren tamaños diferentes.

En lo referente a las partículas PM1 se encontraron algunas diferencias en cuanto a la forma y a la composición química con las partículas de mayor tamaño, que se explicaría por orígenes diversos y una probable resuspensión.

La distribución de partículas entre regiones evidencia diferencias entre las mismas, encontrándose en la región de Xalostoc las mayores concentraciones para los tres tamaños, y en la región de Pedregal las menores concentraciones, comportamiento similar al encontrado en años anteriores, que debiera de compararse con las concentraciones medidas en la RAMA en ese mismo periodo.

7. Conclusiones

El método de observación directa con Microscopía Electrónica de Barrido con Microespectrometría de Rayos X acoplada es el único medio disponible en la actualidad que permite identificar y comparar la morfología integral (forma, tamaño y aspecto) de las partículas de los tres diferentes rangos considerados en este estudio (PM10, PM2.5 y PM1), así como, al determinar su composición química de manera puntual, posibilita también el compararlas para establecer semejanzas y diferencias entre las mismas.

Los resultados obtenidos en el estudio evidencian una relación entre las características morfológicas y químicas de las partículas y el entorno.

En todas las partículas estuvieron presentes elementos químicos como el C y el O, independientemente de su tamaño. Algunos otros elementos se presentaron con una muy alta frecuencia, como es el caso del Si, Al, Na, Ca y Fe, mientras que otros se presentaron sólo ocasionalmente.

A partir de los resultados obtenidos, se elaboró una clasificación que permite agrupar a las partículas antropogénicas para inferir los principales componentes químicos que las constituyen a partir de la observación morfológica.

Se considera que los resultados de este estudio acercan a una caracterización más precisa de las partículas antropogénicas, contribuyendo así al reconocimiento de las mismas en las diferentes regiones de la ZMVM.

8. Recomendaciones para estudios futuros

Continuar con esta línea de investigación, estableciendo estrategias de muestreo *in situ*, es decir, directamente en las fuentes de emisión, lo que permitirá identificar las partículas antes de sufrir posibles alteraciones por interacción con diversos factores del medio.

Sugerir convenios para realizar investigaciones con instituciones de salud referentes a la relación de la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera con el comportamiento de la morbimortalidad de las poblaciones de las regiones estudiadas.

Realizar investigaciones relacionadas con los procedimientos de captación de partículas y manejo de laboratorio con otro tipo de matrices que pudieran permitir la observación directa de las muestras, o bien la eliminación de factores de error en el análisis químico.

Establecer estudios a través del tiempo, correlacionando aspectos morfológicos y químicos de las partículas con variaciones espaciales y temporales.

Extender la ejecución de esta línea de investigación a un período de por lo menos cinco años, para permitir la determinación de las tendencias y el comportamiento de los indicadores seleccionados.

Crear una base de datos que sea de utilidad para la elaboración de un catálogo de partículas antropogénicas características.

9. Referencias Bibliográficas

- Corey, OG. Vigilancia en epidemiología ambiental. Serie de vigilancia 1. Centro Panamericano de Ecología y Salud. México: OPS, OMS, 1995.
- Gehr P., Heyder J. 1998. *Particle lung interactions*. M. Dekker. Nueva York, EUA.
- Harrison, RM., Jones M., Collins, G. 1999. Measurements of the physical properties of particles in the urban atmosphere. *Atmospheric Environment* 33: 309-321.
- Karls, JF., Christensen, ER. Carbon particles in dated sediments from Lake Michigan, Green Bay, and tributaries. 1998. *Environ. Sci. Technol.* 32: 225-231.
- Mamane, Y., Conner, T., *Evaluation of computer-controlled scanning electron microscopy applied to an ambient urban aerosol sample*. 2000.
<http://www.tau.ac.il/geophysics/wellcom/aerosol.html>
- Molina, LT, Molina MJ. 2002. *Air Quality in the Mexico Megacity*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Olaiz G. Vigilancia epidemiológica ambiental. En: De la Fuente, JR. *Información en Salud*. México: McGraw-Hill; 2000. p. 149-159.
- Organización Panamericana de la Salud. Vigilancia ambiental. Serie HSP-UNI. Manuales operativos PALTEX, 1996.
- Sepúlveda JD., 2000. Informe final. INE-CENICA, México.
- Sepúlveda JD., 2001. Informe final. INE-CENICA, México.
- Spurny, KR. 1998. On the physics, chemistry and toxicology of ultrafine anthropogenic, atmospheric aerosols (UAAA): new advances. *Toxicology Letters*. 96,97: 253-261.
- Weingartner, E., Burtscher, H., Baltensperger, U. 1997. Hygroscopic properties of carbon and diesel soot particles. *Atmospheric Environment*. 15: 2311-23