

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

**División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales**

**“Caracterización química y determinación de factores de
emisión de contaminantes emitidos por hornos
crematorios”**

**Tesis para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambiental**

**Presenta:
Ing. Hernández Contreras Janai Monserrat**

**Asesora y Co-asesora:
Dra. Violeta Mugica Álvarez
M. en C. Griselda González Cardoso**

Ciudad de México, enero, 2019

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado No. de beca: 615413

A mis asesoras la Dra. Violeta Mugica Álvarez por el apoyo brindado para realizar este proyecto. A la M. en C. Griselda González Cardoso por su dedicación, empeño, tiempo y enseñanzas a lo largo de este trabajo.

A la Dra. Naxieli Santiago de la Rosa por la paciencia, esfuerzo, dedicación y tiempo prestados para esta investigación. Por compartirme sus conocimientos y experiencias; por el apoyo brindado durante el análisis de carbono negro.

A la Dra. Brenda Liz Valle por el apoyo brindado durante los análisis de laboratorio de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Al Ing. Marín y su equipo de trabajo por todo el apoyo y facilidades brindadas durante los días de muestreo.

A la Dra. Rocío García Martínez por su apoyo en el análisis de metales.

Al equipo de laboratorio, Cecilia e Ivonne por el apoyo durante los análisis de laboratorio.

A Samantha, por hacer más ameno el trabajo experimental dentro de laboratorio, y por todas esas tardes de platica y café.

A los operarios de cada uno de los hornos por todas las facilidades y atenciones prestadas durante los muestreos.

A la empresa funeraria Gayosso que permitió que se llevaran a cabo los muestreos dentro de sus instalaciones.

A las personas que me alentaron y me brindaron su apoyo a lo largo de todo este proyecto.

A mis sinodales por su tiempo para la revisión de este proyecto:

Dra. Naxieli Santiago de la Rosa

Dra. Brenda Liz Valle Hernández

Dra. Rocío García Martínez

Dedicatoria

A mis padres: Lety y Mario por guiar con amor mis pasos, y por alentarme siempre a seguir adelante aún en los momentos más difíciles. A Luis por dejarme recorrer este camino de su mano y por brindarme su soporte, amor y apoyo infinito. A mis mejores amigas: Claudia y Mariana por tantas palabras de aliento y amor.

RESUMEN

El proceso de cremación es aquel donde un cadáver y restos humanos son sometidos a altas temperaturas con la finalidad de reducirlos a cenizas. En la combustión, se emiten a la atmósfera partículas atmosféricas, especies carbonáceas, gases de combustión y metales; entre otros. En la presente investigación se cuantificó la concentración de partículas atmosféricas PM_{2.5} por el método 201 A de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) y partículas suspendidas totales (PST) por el método 5 también de la EPA; esto se llevó a cabo en tres diferentes hornos crematorios pertenecientes a Grupo Gayosso ubicados al norte de la Ciudad de México, obteniendo un promedio para PM_{2.5} y PST de 22.15 mg m⁻³ y 65.35 mg m⁻³ en el horno 1, 101.67 mg m⁻³ y 52.74 mg m⁻³ en el horno 2 y finalmente 106.78 mg m⁻³ y 11.90 mg m⁻³ en el horno 3, respectivamente. Cabe mencionar que las emisiones de PST en los tres hornos crematorios sobrepasaron el límite máximo emitido por la norma (LMP 40 mg m⁻³).

Se realizó también la cuantificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en un cromatógrafo de gases (HP 6890) acoplado a un espectrómetro de masas (HP 5973); y con base en los iones primarios y secundarios de cada uno de los compuestos fue posible determinar el tiempo de retención de los HAP's y a su vez su concentración en PST. Los HAP's cuantificados en los tres hornos crematorios fueron 484.38 µg m⁻³, de los cuales 195.95 µg m⁻³ son HAP's cancerígenos representando el 40%. Por otro lado, la concentración promedio de carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés) en los hornos 1, 2 y 3 fue de 27 µg m⁻³, 206 µg m⁻³ y 162 µg m⁻³ respectivamente; mientras que el carbono orgánico (OC, por sus siglas en inglés) tuvo una concentración promedio de 25 µg m⁻³ en el horno 1, 104 µg m⁻³ en el horno 2 y finalmente 100 µg m⁻³ en el horno 3, todo esto se realizó por medio de un método termo óptico, en el equipo Sunset Laboratory.

De igual forma se realizó la cuantificación de CO utilizando la celda electroquímica Marca Bacharach, Modelo Insight Plus obteniendo un promedio de 80.69 ppm, 328.36 ppm y 169.22 ppm para los hornos 1, 2 y 3; sobrepasando el límite máximo establecido en la normatividad (LMP=120 mg m⁻³). También se realizó la cuantificación de metales, siendo el Mercurio (Hg) el metal más abundante con un promedio de 4.66 µg m⁻³, 3.042 µg m⁻³ y 2.153 µg m⁻³ para los hornos 1, 2 y 3, respectivamente.

A partir de la concentración de los contaminantes cuantificados, se estimaron los factores de emisión de PM_{2.5}, los cuales oscilan entre 0.55 y 1.29 g kg⁻¹ de cuerpo cremado, con base en el coeficiente de Spearman se encontró una correlación positiva (r=0.569) en el FE y el horno

crematorio de donde proviene la emisión de partículas. En cuanto a los FE de CO los valores oscilaron entre 109.28 y 326.67 mg kg⁻¹ de cuerpo cremado y con base en el coeficiente de correlación de Spearman el FE depende de los gramos emitidos a la atmósfera de CO (r=0.92).

Los FE de EC variaron entre 0.0048 y 0.0319 g kg⁻¹ de cuerpo cremado mientras que los de OC oscilaron entre 0.0013 y 0.0149 g kg⁻¹. Por otro lado, los FE de HAP's a excepción del naftaleno y 2-metilnaftaleno están correlaciones positivamente con el peso del cuerpo cremado.

En esta investigación fueron consideradas las características del cuerpo cremado (género, peso, edad, enfermedad), las condiciones de operación (temperatura, tiempo de cremado), el número de servicio, entre otras; con la finalidad de poder determinar si existía alguna correlación que influyera en la cantidad de emisiones provenientes de los hornos crematorios.

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grados celcius
$\mu\text{g m}^{-3}$	Microgramos por metro cúbico
μm	Micrómetro
ANEMEX	Asociación de Necrología Mexicana
BC	Carbono negro (por sus siglas en inglés)
CH ₄	Metano
CN	Carbono negro
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
EC	Carbono elemental
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
g m^{-3}	Gramo por metro cúbico
Gg	Gigagramos
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
LMP	Límite Máximo Permisible
Mg m^{-3}	Miligramo por metro cúbico
NO	Óxido de nitrógeno
OC	Carbono orgánico
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM ₁₀	Partículas atmosféricas con diámetro aerodinámico menor a 10 μm
PM _{2.5}	Partículas atmosféricas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente
ppm	Partes por millón
PST	Partículas Suspendidas Totales

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	4
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
ESTADO DEL ARTE	6
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	9
1.1 Cremación	10
1.2 Proceso de combustión.....	11
1.3 Cremación: Proceso fisicoquímico	11
1.4 Partículas atmosféricas	12
1.5 Cuantificación de partículas atmosféricas	15
1.5.1 Muestreo isocinético.....	15
1.6 Gases de combustión	19
1.6.1 Monóxido de carbono	19
1.6.2 Dióxido de carbono	19
1.6.3 Óxidos de nitrógeno	19
1.6.4 Óxidos de azufre.....	20
1.7 Cuantificación de CO	20
1.8 Carbono orgánico y carbono elemental.....	21
1.8.1 Carbono orgánico	21
1.8.2 Carbono elemental.....	21
1.9 Cuantificación de carbono orgánico y carbono elemental	23
1.9.1 Método termo-óptico (Transmitancia termo-óptica, TOT por sus siglas en inglés) .	23
1.9.2 Reflectancia Termo-óptico (TOR por sus siglas en inglés)	24
1.9.3 Oxidación térmica con dióxido de manganeso	24
1.10 Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's)	24
1.11 Cuantificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos.....	26
1.11.1 Cromatografía de gases.....	26
1.11.2 Cromatografía de líquidos.....	26
1.12 Metales.....	26

1.13	Cuantificación de metales	27
1.13.1	Espectrofotometría por horno de grafito	27
1.13.2	Espectrofotometría por generador de hidruros	27
CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO		29
2.1	Identificación de crematorios a muestrear en la Ciudad de México	29
2.2	Recolección y cuantificación de partículas PM _{2.5} y PST.....	31
2.3	Cuantificación de emisiones de CO.....	34
2.4	Cuantificación de carbono elemental y carbono orgánico	35
2.5	Cuantificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's).....	36
2.5.1	Extracción	37
2.5.2	Reducción	38
2.5.3	Filtración.....	38
2.5.4	Análisis por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas	39
2.6	Cuantificación de metales	40
2.7	Determinación del Factor de Emisión de las emisiones de partículas PM _{2.5} , carbono elemental y carbono orgánico, CO, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales provenientes de hornos crematorios.	42
2.8	Tratamiento de datos.....	44
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS		46
3.1	Concentración de PST y PM _{2.5}	46
3.1.1	Variables en la cremación	52
3.2	Concentración de CO.....	57
3.3	Concentración de carbono elemental y carbono orgánico.....	61
3.4	Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos en PST	64
3.5	Concentración de metales	70
3.6	Factores de emisión	71
3.6.1	Factores de emisión de PM _{2.5}	71
3.6.2	Factores de emisión de CO.....	75
3.6.3	Factores de emisión de carbono elemental y carbono orgánico	75
3.6.4	Factores de emisión para HAP's.....	77
3.6.5	Factores de emisión de metales.....	78
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES		81

REFERENCIAS..... 83

ANEXOS 91

CONGRESOS Y PARTICIPACIONES..... 94

Contenido de Figuras

Figura 1. Diagrama de proceso de cremación.....	10
Figura 2. Proceso de cremación	11
Figura 3. Cabello humano comparado con tamaño de partículas	14
Figura 4. Fotografía del tren de muestreo isocinético	16
Figura 5. Presión velocidad	18
Figura 6. Estructuras de los 16 HAP's considerados como prioritarios	25
Figura 7. a. Horno crematorio visto desde afuera, b. Horno crematorio visto desde adentro (círculo indica ubicación de cámara secundaria)	30
Figura 8. Chimenea con puertos y plataforma de muestreo	30
Figura 9. Pesaje del cuerpo	31
Figura 10. Consola del muestreador isocinético, Marca Seelin, Modelo FF-0012, Serie 0024.....	32
Figura 11. Ciclón de 2.5 μm	32
Figura 12. Caja fría con impactadores.....	33
Figura 13. Celda electroquímica Bacharach.....	34
Figura 14. Analizador de carbono elemental y carbono orgánico modelo Sunset Laboratory.....	35
Figura 15. Filtro de cuarzo impregnado con partículas.....	35
Figura 16. Fotografía de filtro impregnado con partículas	36
Figura 17. Extracción finalizada.....	37
Figura 18. Baño ultrasónico.....	37
Figura 19. Cromatógrafo de gases modelo 6890 plus acoplado a un espectrómetro de masas HP 5973	39
Figura 20. Concentración de PST de Horno Crematorio 1	47
Figura 21. Concentración de PST en Horno Crematorio 2	47
Figura 22. Concentración de PST en Horno Crematorio 3	48
Figura 23. Emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ de Horno 1 con duración de 120 min.	50
Figura 24. Emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ de Horno 2 con duración de 70 min.	51
Figura 25. Emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ de Horno 3 con duración de 70 min.	52
Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes para $\text{PM}_{2.5}$ y el género del cuerpo cremado	53
Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes para $\text{PM}_{2.5}$ y número de servicio	54
Figura 28. Enfermedades más comunes en los muestreos.....	55
Figura 29. Diagrama de cajas y bigotes de la eficiencia en los 3 hornos crematorios	56

Figura 30. Relación de la MCE con la concentración de partículas (mg/m^3)	57
Figura 31. Concentración (ppm) de CO en Horno Crematorio 1.....	58
Figura 32. Concentración (ppm) de CO en Horno Crematorio 2.....	58
Figura 33. Concentración (ppm) de CO en Horno Crematorio 3.....	58
Figura 34. Diagrama de cajas y bigotes de emisiones de CO en los tres hornos crematorios.....	59
Figura 35. Relación entre temperatura y emisión de CO en los tres hornos crematorios.....	60
Figura 36. Correlación entre peso del cuerpo cremado y la emisión de oxígeno.....	61
Figura 37. Concentración de OC y EC en Horno Crematorio 1.....	62
Figura 38. Concentración de OC y EC en Horno Crematorio 2.....	62
Figura 39. Concentración de OC y EC en Horno Crematorio 3.....	62
Figura 40. Concentración de OC y EC En Horno Crematorio 3.....	63
Figura 41. Diagrama de cajas y bigotes de la concentración promedio de HAP's emitidas en los tres hornos crematorios	67
Figura 42. Concentración promedio de los HAP's provenientes de los 3 hornos crematorios	69
Figura 43. Correlación de Spearman para temperatura y peso en horno 1 ($r=0.773$).....	74
Figura 44. Diagrama de cajas y bigotes para FE de carbono elemental (g kg^{-1} cuerpo) y hornos crematorios	76
Figura 45. Diagrama de cajas y bigotes para FE de carbono orgánico (g kg^{-1} cuerpo) y hornos crematorios	76

Contenido de Tablas

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles	1
Tabla 2. Límites Máximos Permisibles para partículas atmosféricas.....	2
Tabla 3. Intervalos IMECAS para partículas atmosféricas.....	14
Tabla 4. Características de operación de hornos crematorios.....	29
Tabla 5. No. de muestreos realizados por horno crematorio	34
Tabla 6. HAP's deuterados con sus respectivos iones, tiempo de retención y masa adicionada en los 50 µL, empleados para la cuantificación de HAP's.	36
Tabla 7. Promedio, desviaciones estándar, coeficientes de variación y masa adicionada de porcentajes de recuperación de HAP's deuterados (N=16).....	38
Tabla 8. Condiciones de operación del análisis cromatográfico.....	40
Tabla 9. Condiciones de operación de espectrofotómetro.....	41
Tabla 10. Parámetros de Calibración	41
Tabla 11. Concentración de partículas emitidas en Horno 1	49
Tabla 12. Concentración de partículas emitidas en Horno 2	50
Tabla 13. Concentración de partículas emitidas en Horno 3	51
Tabla 14. Resultados estadísticos de partículas PM _{2.5} en Horno Crematorio 1, 2 y 3	52
Tabla 15. Prueba de Mann Whitney para concentración de partículas y género del cuerpo cremado	53
Tabla 16. Coeficiente de correlación de Spearman para concentración de partículas y enfermedades	55
Tabla 17. Prueba de Mann Whitney para concentración de partículas y peso	55
Tabla 18. Estadística básica para MCE de los hornos crematorios	56
Tabla 19. Resultados estadísticos de carbono en Hornos Crematorios.....	63
Tabla 20. Concentración total de HAP's (µg m ⁻³). La media y la mediana mostrada es de todas las concentraciones de los muestreos realizados, (n=4).....	65
Tabla 21. Concentración total de HAP's (µg m ⁻³). La media mostrada es de todas las concentraciones de los muestreos realizados.....	66
Tabla 22. Concentración total de HAP's (µg m ⁻³). La media mostrada es de todas las concentraciones de los muestreos realizados.....	66
Tabla 23. Correlación de Spearman para HAP's de 2 y 3 anillos aromáticos (n=16), p>0.05	68

Tabla 24. Correlación de Spearman para HAP's de 4, 5 y 6 anillos aromáticos (n=16), $p>0.05$	69
Tabla 25. Estadística básica para metales emitidos en el Horno Crematorio 1 (n=4)	70
Tabla 26. Estadística básica para metales emitidos en el Horno Crematorio 2 (n=6)	70
Tabla 27. Estadística básica para metales emitidos en el Horno Crematorio 3 (n=6)	70
Tabla 28. Correlaciones de Spearman para metales, n=16 y $p>0.05$	71
Tabla 29. Factores de emisión y concentración de $PM_{2.5}$, Horno Crematorio 1	72
Tabla 30. Factores de emisión y concentración de $PM_{2.5}$, Horno Crematorio 2	72
Tabla 31. Factores de emisión y concentración de $PM_{2.5}$, Horno Crematorio 3	72
Tabla 32. Prueba de Mann-Whitney para variables de los hornos 2,3 y horno 1.....	73
Tabla 33. Factores de emisión promedio de $PM_{2.5}$ para los 3 hornos crematorios	75
Tabla 34. Factores de emisión para CO.....	75
Tabla 35. Factores de emisión para EC y OC	77
Tabla 36. Factores de emisión para HAP's	77
Tabla 37. FE de metales en los hornos crematorios	78
Tabla 38. Compuestos cuantificados en hornos crematorios	79

Contenido de Anexos

Anexo 1. Estadística básica de partículas suspendidas totales en Horno Crematorio 1, 2 y 3	91
Anexo 2. Prueba de Mann-Whitney para concentración de partículas y número de servicio	91
Anexo 3. Coeficiente de correlación de Spearman para $PM_{2.5}$ y número de servicio	91
Anexo 4. Coeficiente de correlación de Spearman para $PM_{2.5}$ y el peso de los cadáveres	91
Anexo 5. Prueba de Mann-Whitney para concentración de partículas y edad	91
Anexo 6. Coeficiente de correlación de Spearman para peso del cuerpo y oxígeno medido en la salida de la chimenea	92
Anexo 7. Coeficiente de correlación de Spearman para peso del cuerpo y carbono orgánico y elemental	92
Anexo 8. Prueba de Mann Whitney para concentración de HAP's y hornos crematorios	92
Anexo 9. Prueba de Mann-Whitney para variables de hornos crematorios.....	93
Anexo 10. Prueba de Mann-Whitney para carbono elemental y carbono orgánico de los hornos crematorios	93

INTRODUCCIÓN

El proceso de cremación en la Ciudad de México se ha transformado en una práctica que ayuda a equilibrar la demanda de las inhumaciones por la falta de espacio en los panteones públicos y privados. Entre los años 2015 y 2016 se llevaron a cabo 64 369 cremaciones, teniendo un aumento de 2 500 servicios al año; esto de acuerdo con datos proporcionados por la Consejería Jurídica y de Servicios Legales (SEDEMA, 2017).

La cremación de un cuerpo se lleva a cabo por medio de un proceso de combustión que logra temperaturas hasta de 950°C; durante el desarrollo de este proceso son emitidas a la atmósfera partículas suspendidas totales (PST), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y azufre (SO) que son precursores de otros contaminantes atmosféricos, así como carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés) (hollín) metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) (Montenegro, 2005). La emisión de estos contaminantes a la atmósfera depende del diseño del horno crematorio, temperatura de combustión, tiempo de retención, diseño de la chimenea y cualquier equipo de control con el que cuente el horno crematorio (Emission Inventory Guidebook, 2013).

La Ciudad de México publicó el 26 de julio del 2018, la Norma Ambiental NADF-017-AIRE-2017 que establece los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera así como las condiciones de operación que deberán cumplir los responsables de las fuentes emisoras ubicadas en la Ciudad de México, que realicen actividad de cremación de cadáveres humanos o la incineración de cadáveres de animales, los límites establecidos en la norma anteriormente mencionada únicamente aplican para PST, CO y NO_x, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles
CONTAMINANTE **LIMITE MAXIMO DE EMISION (mg m⁻³)**

Partículas suspendidas	40
Monóxido de carbono	120
Óxidos de nitrógeno	180

Fuente: NADF-017-AIRE-2017

Las emisiones provenientes de hornos crematorios son fuentes fijas que también contribuyen a la alteración de la calidad del aire que nos rodea, es decir, ocasionan graves problemas a la salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que más de dos millones de personas mueren cada año, a consecuencia de la inhalación de pequeñas partículas contaminantes en el aire, dando mayor importancia a las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , las cuales, son aquellas que poseen un diámetro aerodinámico menor a 2.5 y 10 μm , respectivamente. Esto debido a que las partículas $PM_{2.5}$ pueden penetrar a los pulmones y llegar al torrente sanguíneo ocasionando con esto cardiopatías, cáncer de pulmón, asma e infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (OMS, 2011).

Por otro lado, en México la Secretaría de Salud emitió la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, donde se establece los límites máximos permisibles de partículas en aire ambiente (Tabla 2); y la NOM-021-SSA1-1993 para establecer de 12 $\mu g m^{-3}$ el límite máximo permisible de CO, en promedio de ocho horas.

Tabla 2. Límites Máximos Permisibles para partículas atmosféricas

Normatividad	Clasificación	Concentración media anual ($\mu g m^{-3}$)	Concentración media de 24 horas ($\mu g m^{-3}$)
NOM-025-SSA1-2014	$PM_{2.5}$	12	45
	PM_{10}	40	75

Fuente: NOM-025-SSA1-2014

También en la norma de fuentes fijas de la Ciudad de México el CO se encuentra normado, ya que es considerado un contaminante criterio. El daño que puede ocasionar a los seres humanos va a depender de la dosis, la duración y la vía de ingreso. La principal fuente de emisión es causada por las fuentes móviles; y tiene una duración aproximada en el aire de dos meses. La intoxicación con CO es la principal causa de muerte por intoxicación en Estados Unidos, las personas que padecen de enfermedades cardiacas o pulmonares son las más vulnerables a los efectos tóxicos; es por esta razón que la EPA establece un límite máximo permisible de 10 $mg m^{-3}$ de CO en el aire durante 8 horas que no debe excederse más de una vez al año; por otro lado, la OSHA estableció un límite de 55 $mg m^{-3}$ en el aire durante una jornada laboral de 8 horas, en una semana de trabajo de 40 horas (ATSDR, 2009).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) son emitidos en la cremación debido a que se forman en un proceso de pirólisis de compuestos orgánicos. La formación de estos compuestos va a depender de las condiciones de la combustión (temperatura, turbulencia, exceso de aire y tiempo de residencia) (Albers, 1995).

Se han encontrado en diferentes ciudades grandes concentraciones de HAP's, estos producidos por los automóviles y/o fuentes directas de combustión existentes. Sin embargo, también se encuentran en sedimentos y aguas (Carrera *et al.*, 2001). El carbono elemental también denominado carbono negro se encuentra en las partículas finas (carbono negro cuando su método de medición es óptico y carbono elemental cuando el método es químico) por lo que puede transportar sustancias peligrosas hasta los pulmones. Bahner *et al.*, (2007) indican que en Estados Unidos de América son estimados alrededor de 125 mil casos al año de cáncer que son asociados a las partículas que son emitidas en la combustión de diésel. Por otro lado, de acuerdo a estimaciones realizadas por Jacobson (2007) el carbono elemental contribuye con un 16% al calentamiento global, únicamente por debajo de CO₂; esto debido a que el carbono elemental absorbe la luz solar y la irradia nuevamente a la atmósfera en forma de calor.

En las emisiones también se pueden encontrar metales. La exposición a ellos puede ocasionar diversos efectos tóxicos en la salud de los seres humanos, debido a los efectos carcinógenos, neurotóxicos que ocasionan (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000). En México la Secretaría de Salud emitió la Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, donde se establece el valor permisible para la concentración de plomo en el aire ambiente, siendo este de 1.5 µg m⁻³ en un periodo de tres meses promedio.

Para poder estimar las emisiones de estos contaminantes se emplea el uso de factores de emisión, estos son desarrollados a partir de diferentes mediciones realizadas en base a una muestra representativa de la fuente de emisión.

En esta investigación se cuantificaron las concentraciones de PM_{2.5}, EC, OC, CO HAP's y metales emitidas por los hornos crematorios y se determinaron los factores de emisión de partículas PM_{2.5}, carbono elemental y orgánico, monóxido de carbono, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales. Para realizar el muestreo de PM_{2.5} se adaptó la metodología de muestreo isocinético en conjunto con el método 201 A de la EPA, mientras que para el muestreo de PST se utilizó el método 5 de la EPA.

HIPÓTESIS

La cremación de cadáveres genera emisiones de partículas $PM_{2.5}$ que contienen carbono elemental, carbono orgánico, hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales y CO, que exceden las normas mexicanas contribuyendo a la contaminación del aire.

JUSTIFICACIÓN

En el año 2013 el INEGI reportó 74,566 defunciones en el Distrito Federal (actualmente Ciudad de México) y de acuerdo con datos expresados por la Asociación de Necrología Mexicana (ANEMEX) cuatro de cada nueve personas fueron cremadas (INEGI, 2014). Sin embargo, se están presentando problemas de entierro debido a que el espacio disponible para inhumaciones es cada vez menor; ocasionando consigo el aumento de crematorios, por lo que es necesario determinar los contaminantes que emiten, así como sus concentraciones e implicaciones en la contaminación atmosférica.

Las $PM_{2.5}$ deben ser cuantificadas en emisiones de hornos crematorios, sin embargo, no se incluyen en la norma NADF; por lo que es importante cuantificarlas debido a su potencial riesgo a la salud y se prevé que sus instalaciones dentro del país se irán acrecentando; la cremación genera tanto contaminantes criterio como el CO y los NO_x , además de partículas de diferentes tamaños que pueden contener especies tóxicas que representen un riesgo a la salud.

Actualmente en la Ciudad de México los hornos crematorios son evaluados bajo la norma NADF-017-AIRE-2017 pero en el resto del país los hornos siguen siendo regulados por la Norma Oficial Mexicana NOM-043-SEMARNAT-1993 que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas; sin embargo cabe mencionar que esta norma fue diseñada para la evaluación de emisiones originadas por actividades industriales que cuentan con procesos más complejos en comparación con un horno crematorio, lo que significa que al ser evaluados bajo esta norma siempre cumplen con el límite máximo permisible (Secretaría del Medio Ambiente, 2017). Con la entrada en vigor de la norma NADF-017-AIRE-2017 se solicita la medición de gases de CO y óxidos de nitrógeno; por lo que surge la necesidad de determinar las emisiones generadas y su composición para desarrollar recomendaciones en materia de emisiones a la atmósfera con el fin de prevenir, controlar y mitigar la emisión de contaminantes a la atmósfera para mejorar la calidad del aire.

Considerando que el CO₂ y el carbono negro contribuyen al cambio climático, las partículas, los HAP's y los metales son un riesgo a la salud humana es de vital importancia contar con los factores de emisión que determinen la cantidad de contaminantes que se emiten por la actividad de cremación; cabe mencionar que México presenta una carencia en cuanto a FE de PM_{2.5}, CO, HAPs, OC, EC y metales provenientes de hornos crematorios.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la composición química y los factores de emisión de los contaminantes provenientes de hornos crematorios.

Objetivos Específicos

- i. Adaptar la metodología de muestreo isocinético basada en la NMX-AA-010-SCFI-2001, en conjunto con el Método 201 A de la EPA para cuantificar las emisiones de partículas PM_{2.5} empleando un ciclón de dicho tamaño (2.5 µm).
- ii. Cuantificar las emisiones de CO.
- iii. Cuantificar las concentraciones de EC y OC emitidas en hornos crematorios.
- iv. Cuantificar los HAP's emitidos en los hornos crematorios.
- v. Cuantificar los metales emitidos en los hornos crematorios.
- vi. Estimar los factores de emisión de los compuestos cuantificados.

ESTADO DEL ARTE

Japón incinera el 99% de los cadáveres siendo este el porcentaje más alto en el mundo; por ello se llevó a cabo un estudio para medir las concentraciones de dioxinas en 10 distintos crematorios, así como la relación que existía entre ellas y factores como estructura, equipo y estado operativo del crematorio. Los resultados mostraron que, aunque el sexo y la edad de los cadáveres no afecta en la concentración de dioxinas; el contar con un colector de polvo si afecta la emisión de contaminantes ya que este disminuye en un 58% la eliminación de dioxinas (Takeda *et al*, 2000).

Japón realizó un estudio para determinar emisiones de mercurio, para ello seleccionó siete crematorios. La cantidad de mercurio se calculó a partir de la concentración total y el caudal del gas. La emisión anual se calculó utilizando el número total de cadáveres. Obtuvieron una emisión promedio de mercurio de entre 0.2 y 82.7 $\mu\text{g m}^{-3}$; y estimaron una emisión anual de 35.1 kg (Takaoka *et al*, 2010).

Por otro lado, Costa Rica en el año 2015 publicó un reglamento para la operación de hornos crematorios con el objetivo de lograr un control más estricto sobre la calidad del aire y niveles de emisión de sustancias contaminantes. El reglamento a su vez establece los límites máximos permisibles de PST (40 mg m^{-3}), ácido clorhídrico (HCl) (60 mg m^{-3}), CO (15 mg m^{-3}), SO (200 mg m^{-3}) e hidrocarburos totales (20 mg m^{-3}) (Reglamento para la operación de hornos crematorios, 2015).

En España, se realizó en el año 2013 una evaluación de impacto en salud de un crematorio en la localidad de Sant Joan D'Àlacant; empleando un modelo de dispersión de contaminantes con la finalidad de examinar las emisiones, exposiciones y riesgos asociados al funcionamiento del horno crematorio. El estudio reveló que las emisiones de monóxido de carbono superaban en 1.28 veces los límites de la legislación nacional (LMP CO 625 mg m^{-3}) (Agencia Valenciana de Salut, 2013).

Australia establece sus lineamientos para desarrollar buenas prácticas de cremación, donde tiene normados contaminantes como: partículas (0.450 g m^{-3}), óxidos de nitrógeno (2.500 g m^{-3}), compuestos de cloro excepto ácido clorhídrico (0.200 g m^{-3}), ácido clorhídrico (0.400 g m^{-3}), compuestos de flúor (0.100 g m^{-3}) y metales pesados (0.200 g m^{-3}). Su objetivo es disminuir los límites de estos contaminantes y agregar monóxido de carbono, compuestos orgánicos, mercurio y cadmio (ACCA, 2004).

Ecuador tiene de igual manera sus límites máximos permisibles, ellos incluyen benzo[e]pireno y dibenzo[a]antraceno, monóxido de carbono, partículas, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre siendo sus límites $92 \mu\text{g Nm}^{-3}$, 87^1mg Nm^{-3} , 55mg Nm^{-3} , 610mg Nm^{-3} y 109mg Nm^{-3} respectivamente (Norma técnica para emisiones a la atmósfera de fuentes fijas, 2014).

¹ Miligramos por metro cúbico a condiciones normales, 1.013 mbar, 0°C, en base seca y corregidos al 11% de oxígeno

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En la Ciudad de México la cremación fue aceptada principalmente por causas higiénicas ya que se tenía la necesidad de evitar focos de infección y eliminar fuentes productoras de microorganismos; y la única solución que ofrecía garantías inmediatas era la destrucción de los cadáveres por medio de la combustión. Al mismo tiempo las zonas donde se localizaban los cementerios en la Ciudad de México tenían un inconveniente de suelo ya que mayormente estaba constituido por tepetate, lo que favorecía la filtración del agua ocasionando con esto manantiales con agua contaminada (Ramos-de Viesca, *et al*, 2002).

En el año de 1909, se da la autorización para la construcción de los dos primeros hornos crematorios en la Ciudad de México, los cuales se construyeron en el Cementerio de Dolores con materiales importados de Alemania. La construcción tuvo forma de T, una chimenea de 30 metros de altura, sobre plataformas de cemento con altura de 5 metros, por 5 m de longitud y 2.5 m de ancho. En la parte interna contaba con varios canales en todas las direcciones que permitían el paso a los gases de combustión y al aire para generar el calor. El aire caliente era manejado por medio de registros y compuertas que eran operadas desde la parte exterior. En cuanto a las cenizas pasaban por los huecos de las parrillas de barro refractario para después ser depositadas en una segunda cámara construida en un plano inclinado donde se continuaba con el proceso de incineración en caso de que aun existieran fragmentos de hueso sin calcinarse.

La cámara con la que contaba el primer horno estaba hecha para albergar hasta cinco cadáveres humanos; este horno era empleado para aquellos cadáveres que no contaban con identificación. El horno de menor tamaño era particular y únicamente contaba con capacidad para una persona. El proceso de incineración duraba aproximadamente dos horas y el peso de las cenizas estaba alrededor de los 3 kg, la temperatura generada al interior del horno era de 1200 a 1500 °C; estos hornos fueron construidos por el señor César J. Manburg (Ramos-de Viesca, *et al*, 2002).

Actualmente en la Ciudad de México operan alrededor de 40 hornos crematorios (SEDEMA, 2017).

1.1 Cremación

La cremación es el proceso mediante el cual un cadáver, restos humanos y restos humanos áridos se someten a altas temperaturas con objeto de reducirlos a cenizas. Durante la cremación los contaminantes atmosféricos que son emitidos por la combustión de materia orgánica son: gases de combustión, metales pesados, dioxinas; entre otros contaminantes orgánicos, por lo que las políticas ambientales se vuelven cada vez más estrictas con respecto a la emisión de estos y otros contaminantes potencialmente tóxicos.

Un horno puede estar compuesto por una o dos cámaras de combustión. En la primera se coloca el cadáver a incinerar, donde se inyecta aire logrando un buen mezclado con el cuerpo, de esta manera es posible que la combustión se lleve durante todo el tiempo. En la primera cámara se realiza un precalentamiento de por lo menos 30 minutos para alcanzar temperaturas de 483°C. En la segunda cámara entran los gases de combustión, los productos de la combustión incompleta y todas las partículas del proceso. Entre cada proceso de cremación se da un tiempo de alrededor de hora y media para que el horno pueda bajar su nivel de temperatura (Agency, 2008).

La Figura 1. muestra el diagrama de proceso que se lleva a cabo en la cremación de cadáveres humanos, desde el momento en el que llega el cuerpo hasta que las cenizas son entregadas a sus familiares.

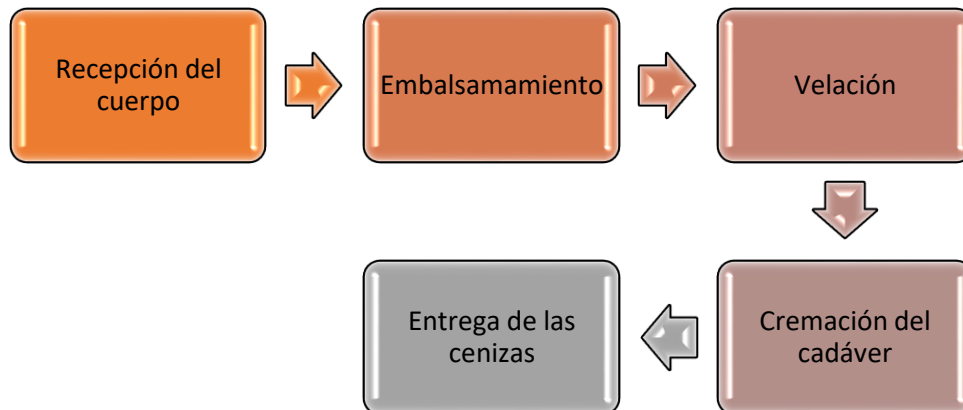


Figura 1. Diagrama de proceso de cremación

Durante el embalsamamiento la sangre del cuerpo es drenada mediante la inyección de una mezcla de sustancias a base de ácido fólico, formol, glicerina, alcohol y agua; así como algunos conservadores para mantener en buen estado el cuerpo hasta el momento de su cremación; este procedimiento se realiza en un máximo de dos horas (Pan American Health Organization, 2004). La

actividad de interés es la cremación o incineración del cadáver. La Figura 2 muestra en particular el proceso de cremación.

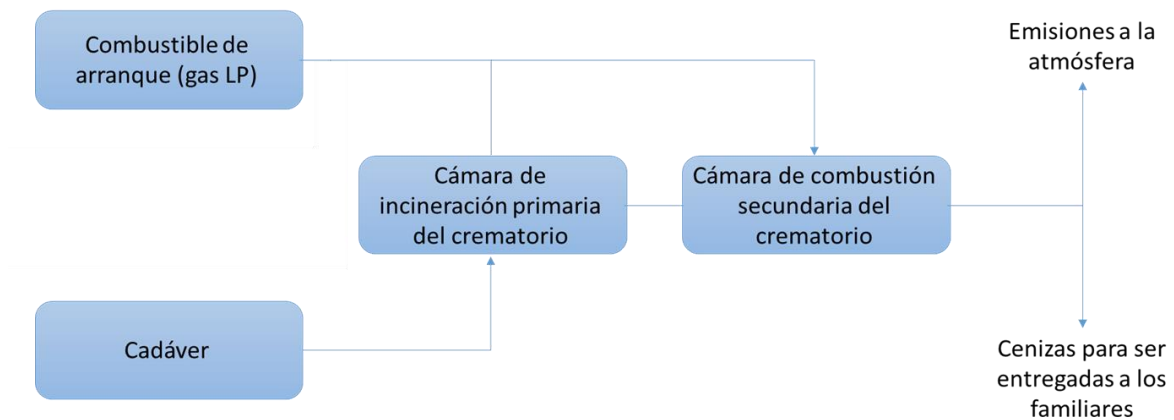


Figura 2. Proceso de cremación

Fuente: Imagen modificada de Agency, 2008

1.2 Proceso de combustión

La combustión es una reacción de oxidación exotérmica, homogénea que se lleva a cabo en fase gaseosa (Gardiner, 1999), esta reacción se realiza en una fracción de segundo (Baukal, 2001).

En esta reacción pueden intervenir combustibles sólidos, líquidos y gases, sin embargo, como el párrafo anterior lo dice es una reacción que se lleva a cabo en fase gas, por lo que primero en combustibles sólidos se da una gasificación (Yeager, 1973).

Cuando se usan combustibles líquidos, estos deben estar en forma de gotas para que puedan pasar rápidamente a estado de vapor y oxidarse en forma gaseosa; originando con esto que la reacción de combustión sea limitada por el nivel de evaporación.

Por otro lado, con combustibles sólidos se dan dos fases, en la primera; la fracción volátil del sólido es destilada y oxidada como un gas, mientras que en la segunda; la fracción de carbón remanente se quema como un sólido (Beard, *et al.*, 1980)

1.3 Cremación: Proceso fisicoquímico

El proceso fisicoquímico en la cremación está compuesto por dos etapas. En la etapa 1 se lleva a cabo el proceso de deshidratación: el cuerpo humano está conformado por tejidos blandos y duros; al iniciar esta etapa, el calor se conduce a través del cuerpo y lo primero que desaparece es el cabello. El agua que contiene el cuerpo es evaporada y desaparecen las partes blandas que a su vez están formadas por agua y material orgánico. El esqueleto que está formado por compuestos

orgánicos (colágeno, polisacáridos y aminoácidos), agua y sustancias orgánicas no combustibles que también sufren cambios fisicoquímicos por la combustión, la parte inorgánica prevalece por más tiempo, que es lo que llamamos hueso mineral, el cual es deformado y fragmentado (Carreño, 2001).

En la etapa 2 hay una transformación de la estructura ósea: esta etapa está dividida por cinco estadios de combustión. El primer estadio se da entre los 200 y 300°C, a esta temperatura la coloración del hueso cambia de color marfil a gris parduzco; en este estadio se presenta una ligera reducción de volumen debido a la pérdida de agua. Entre los 300 y 400°C se presenta el segundo estadio, conforme aumenta la temperatura la coloración del hueso va cambiando de una coloración marrón a marrón oscuro; y al llegar a los 400°C el hueso presenta un color negrozco ocasionado por la combustión parcial de la materia inorgánica del tejido óseo.

Alrededor de los 550°C se presenta el tercer estadio donde la coloración del hueso cambia de gris oscuro a gris claro, aunque en el interior del tejido se observa aun una tonalidad negra. El cuarto estadio se presenta entre los 650 y 700°C, este estadio está caracterizado por los fragmentos óseos con una coloración blanco mate y consistencia blanda (tipo yeso). Al llegar a los 750°C se presenta una reducción progresiva en el hueso.

Finalmente, el ultimo estadio es a partir de los 800°C. El hueso ya tiene apariencia lisa y consistencia dura y resistente, esto ocasionado a la concreción que forma el mineral apatita, aparecen fisura y se da una reducción de entre el 10 y 12% de volumen. Durante este estadio el hueso ya tiene una coloración blanca. Los huesos sobrantes son triturados y conforman el polvo que queda como cenizas que están conformadas principalmente por fosfatos (Wahl, 1982).

Las cenizas dependiendo de factores como la temperatura de combustión, edad, sexo, enfermedades, medicamentos entre otras representa aproximadamente el 3.5% del peso inicial del cadáver de un adulto y el 1% de un bebé (Trancho, 2010).

1.4 Partículas atmosféricas

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define a las partículas atmosféricas como: partículas sólidas o líquidas transportadas por el aire, las cuales podemos observar en forma de humo, polvo y neblina (IPCC, 2007). Las PST conforman una mezcla de materiales líquidos y sólidos que son distintas en cuanto a tamaño, forma y composición, esto depende principalmente de su origen. Pueden ser de origen natural entre los que se encuentran actividad volcánica, suelos erosionados, incendios forestales, entre otros; mientras que en origen

antropogénico está la combustión de papel, madera, carbón y/o procesos metalúrgicos (Rojas Bracho Rojas *et al.*, 2003). Las partículas son clasificadas de acuerdo al tamaño en su diámetro aerodinámico; siendo las de mayor importancia $PM_{2.5}$ y PM_{10} por ser capaces de actuar como transporte de sustancias tóxicas que se adhieren o se absorben a la superficie de las mismas.

Las partículas atmosféricas son consideradas contaminantes primarios lo que significa que son generadas directamente en la fuente, ya sea en estado sólido o líquido, pueden ser orgánicas o inorgánicas (Flores, 1997). Estas principalmente están conformadas por partículas carbonáceas (50-80 %) (Cachier *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2014), metales, cationes y aniones. En la parte orgánica de las partículas carbonáceas están los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) (Feng *et al.*, 2006; Hui *et al.*, 2008). Por otro lado, la parte inorgánica de las partículas está constituida por carbono negro (CN) o carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés).

El daño que ocasionan las partículas atmosféricas a los seres humanos depende principalmente de dos factores: su tamaño y su composición; en la Figura 3 se aprecia la comparación del tamaño de un cabello humano con el tamaño de las partículas, las partículas PM_{10} son capaces de atravesar las barreras de la nariz y conducirse por la garganta hasta llegar finalmente a los pulmones ocasionando con esto enfermedades respiratorias, la OMS (2011) indica que al reducir la concentración de partículas PM_{10} de 70 a 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la media anual en una ciudad, se favorecería a la reducción del 15% de la mortalidad a causa de enfermedades respiratorias; sin embargo, las $PM_{2.5}$ debido a que cuentan con un menor tamaño penetran con una mayor facilidad hasta los alveolos del sistema respiratorio y posteriormente al torrente sanguíneo. Se debe considerar también que pueden contener compuestos tóxicos orgánicos y metales pesados, ocasionando con esto enfermedades respiratorias, cardiovasculares y en tiempos prolongados de exposición pueden provocar la muerte; las $PM_{2.5}$ están constituidas en un 40% con EC (EPA, 2010).

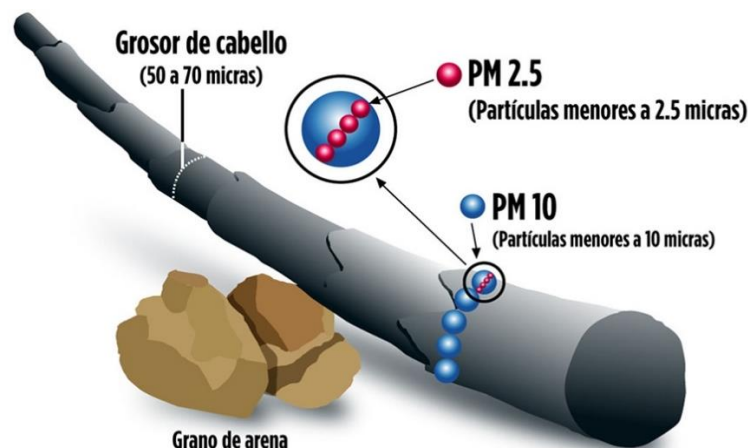


Figura 3. Cabello humano comparado con tamaño de partículas

Fuente: <https://phys.org/news/2014-03-clean-air-efforts-analysis.html>

Con la finalidad de mantener informada a la población en la Ciudad de México acerca de si las concentraciones de los contaminantes atmosféricos se encuentran dentro de los límites establecidos se implementó el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, evitando de esta forma exponer a la población a enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Cuando son rebasadas determinadas concentraciones en las partículas atmosféricas PM_{2.5} y PM₁₀ los valores de los IMECA's son relacionados con posibles impactos en la salud de la población (Tabla 3).

Tabla 3. Intervalos IMECAS para partículas atmosféricas

CALIDAD DEL AIRE	INTERVALOS	CONCENTRACIÓN ($\mu\text{g m}^{-3}$)		RIESGOS Y RECOMENDACIONES
		PM ₁₀	PM _{2.5}	
Buena	0 – 50	0 – 40	0 – 12	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
Regular	51 – 100	41 – 75	12.1 – 45	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
Mala	101 – 150	76 - 214	45.1 - 97.4	Evite las actividades al aire libre, esté atento a la información de calidad del aire. Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos.
Muy mala	151 – 200	215 - 354	97.5 - 150.4	Efectos adversos a la salud de la población en general. Se agravan los síntomas en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.
Extremadamente mala	201 – 300	> 354	> 150.4	Efectos graves a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.

Fuente: Tabla modificada de Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2017

1.5 Cuantificación de partículas atmosféricas

Existen diferentes métodos de cuantificación de partículas que pueden ser manuales, a distancia o extractivos (Crespo, 2007). Para fuentes fijas el método más común es el 5 de la EPA. En México se tiene la Norma Mexicana NMX-AA-010-SCFI-2001 (DOF, 2001); que establece el procedimiento para realizar muestreo isocinético, determinar la concentración y emisión de partículas totales contenidas en los gases que fluyen por un ducto.

En esta investigación para la cuantificación de partículas $PM_{2.5}$ se empleó el Método 201 A de la EPA que determina las emisiones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en fuentes fijas, el cual presenta la metodología que se basa en el muestreo isocinético, que consiste en tomar una alícuota de la fuente de emisión y cuantificar la concentración del gas emitido, así como el flujo del gas que lo porta. La cuantificación de PST se realizó con base en el método 5 de la EPA, que al igual que el método 201 es mediante muestreo isocinético; la masa de las partículas es cuantificada gravimétricamente después de eliminar la humedad del filtro.

1.5.1 Muestreo isocinético

El muestreo isocinético (Figura 4) es un muestreo manual y directo que toma en consideración la velocidad, temperatura, concentración, contenido de humedad, la presión atmosférica y la presión de vacío (González, 2016).

La finalidad de este muestreo es obtener una alícuota de la fuente fija, esto se logra al igualar la velocidad de los gases que son muestreados con la velocidad de los gases que provienen de la combustión (EPA, 2010). El muestreo debe llevarse a cabo en condiciones normales de operación, y el flujo dentro del ducto debe permanecer constante.



Figura 4. Fotografía del tren de muestreo isocinético

Una manera de concluir si el muestreo de $PM_{2.5}$ se realizó de forma correcta es mediante el porcentaje de isocinetismo, que de acuerdo con el método 201 A de la EPA se calcula como sigue:

$$\% I = \frac{100 T_s V_{ms} 29.92}{60 V_s \theta A_n P_s (1 - B_{ws}) 528}$$

Donde:

T_s = Temperatura de los gases en la chimenea

V_{ms} = Volumen muestreado a condiciones normales y flujo volumétrico del gas a condiciones estándar

V_s = Velocidad del gas en la chimenea

θ = Tiempo total

A_n = Área de la boquilla

P_s = Presión absoluta estática de la chimenea

B_{ws} = Contenido de humedad en los gases

Para PST, de acuerdo con el método 5 de la EPA el porcentaje de isocinetismo se calcula con la ecuación siguiente:

$$\% I = \frac{100 * T_s \left(K_3 * V_w + \left(\frac{(V_m - (Inf * \theta)) * Y}{T_m} \right) * \left(P_{bar} + \left(\frac{\Delta H}{13.3} \right) \right) \right)}{60 * \theta * V_s * A_n * P_s}$$

Donde:

T_s = Temperatura absoluta promedio de los gases en la chimenea

$K_3 = 0.00354$

V_w = Volumen total de agua colectada durante el muestreo

V_m = Volumen de gas muestreado a condiciones normales

Y = Factor de calibración del medidor de gases

T_m = Temperatura absoluta promedio en el medidor de gases

P_{bar} = Presión barométrica en el lugar de la prueba

ΔH = Presión diferencial promedio a través del medidor de orificio

θ = Tiempo total de muestreo

V_s = Velocidad media de los gases

P_s = Presión absoluta en la chimenea

A_n = Área transversal de la boquilla

Para garantizar que la velocidad en la entrada de la boquilla sea igual a la velocidad del flujo en el ducto el isocinetismo en el muestreo debe ser del 100 %, sin embargo, al no ser un proceso con condiciones de operación estables, el método 201 A de la EPA en el apartado 1.6 indica que el valor de isocinetismo puede variar entre un 80 y 120%, mientras que el método 5 establece un intervalo de isocinetismo de entre 90 y 110% en su apartado 12.11.3.

1.5.1.1 Velocidad de gases

La Norma Mexicana NMX-AA-009-SCFI-1993 indica el método para la determinación de la velocidad de gases (v_s) esta norma a su vez está basada en el método 1 de la EPA: Determinación del punto y velocidad de toma de muestra para fuentes fijas y el método 2 de la EPA Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica de gases en la chimenea.

El cálculo de la velocidad es realizado por medio del tubo pitot que mide la presión, velocidad en el ducto y a su vez determina la velocidad dentro del fluido. La diferencia que existe entre la presión total y la presión estática indica la velocidad del gas (Figura 5) (González, 2016).

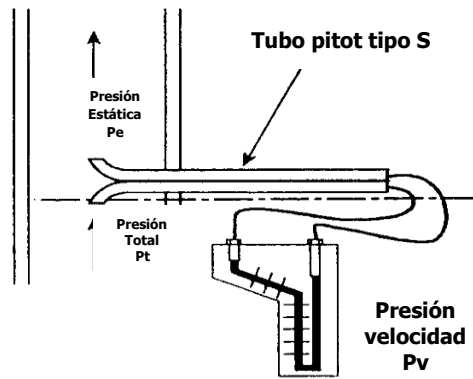


Figura 5. Presión velocidad

Fuente: González, 2016

1.5.1.2 Velocidad de entrada en la boquilla

La velocidad de entrada en la boquilla se calcula en base al método 201 A de la EPA, apartado 12.5. Se utiliza la ecuación $V_n = Q_s/60/A_n$ donde Q_s es el flujo del gas muestreado a condiciones normales, A_n área transversal de la boquilla.

1.5.1.3 Contenido de humedad

La humedad es calculada en base al método 4 de la EPA, la humedad es colectada en impactores de la caja fría que contiene el equipo isocinético, para posteriormente ser determinada de forma volumétrica y gravimétrica. La humedad puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$B_{ws} = \frac{V_{wc(std)} + V_{wsg(std)}}{V_{wc(std)} + V_{wsg(std)} + V_{m(std)}}$$

Donde:

$V_{m(std)}$ = volumen del gas muestreado a condiciones estándar

$V_{wsg(std)}$ = volumen de vapor de agua colectada en la silica gel

$V_{wc(std)}$ = volumen de vapor de agua a condiciones normales

1.6 Gases de combustión

Durante el proceso de cremación son emitidos a la atmósfera CO, CO₂ y NO_x y SO₂.

1.6.1 Monóxido de carbono

El CO resulta de una combustión incompleta ocasionado por bajas temperaturas y/o tiempos de residencia inadecuados, este es producido en las primeras etapas de la combustión; estas emisiones pueden ser minimizadas con temperaturas por encima de los 900°C y con tiempos de residencia de al menos 2 segundos (Seekel *et al.*, 1987).

En altas concentraciones el CO afecta el transporte del oxígeno en la sangre pudiendo ser letal debido a que puede fijarse a la hemoglobina 5 veces más fácilmente que el oxígeno ocasionando daños cerebrales, cardiovasculares y renales (Flores, 1997); por lo que es regulado en aire ambiente en la Ciudad de México por la NOM-021-SSA1-2003, por organizaciones como la OMS y la EPA en un promedio de 8 horas, siendo el LMP en aire de 11 ppm, 10 ppm y 9 ppm respectivamente; y por la norma ambiental NADF-017-AIRE-2017 con un LMP de 120 mg m⁻³.

1.6.2 Dióxido de carbono

Es el gas de efecto invernadero más importante asociado a las actividades humanas y el segundo más importante en el calentamiento global; este gas es proveniente de fuentes antropogénicas y naturales. Proveniente de actividad humana el dióxido de carbono es emitido principalmente por el consumo de combustibles fósiles como son carbón, petróleo y sus derivados. El dióxido de carbono se observa en la combustión completa, para ello es necesario que la temperatura de combustión sea la adecuada y la cantidad de oxígeno sea la requerida estequiométricamente. El tiempo de residencia de los gases debe ser el óptimo y debe existir una mezcla ideal de los combustibles en forma gaseosa (Wei *et al.*, 2012).

1.6.3 Óxidos de nitrógeno

El óxido de nitrógeno o monóxido de nitrógeno (NO) es un gas que sale de las chimeneas en procesos de combustión a altas temperaturas. Es un gas que no presenta coloración y que en la atmósfera se combina rápidamente con el oxígeno para dar formación al NO₂ (dióxido de nitrógeno, de color pardo), en la atmósfera baja del NO₂ se rompe fotoquímicamente y se combina con el oxígeno para dar paso a la formación de ozono en adición con el NO; siendo este último un fuerte oxidante (Never, 1998).

Existen 3 mecanismos de formación de NO.

- i. Térmico, que se da por la reacción del nitrógeno y el oxígeno en temperaturas por arriba de los 1100°C, también se le conoce como el mecanismo de Zeldovich.
- ii. Inmediato o mecanismo de Fenimore, se da por medio de una reacción rápida entre el nitrógeno, oxígeno y radicales de HAP's.
- iii. Combustible, formado por la oxidación directa de los compuestos orgánicos del nitrógeno que se encuentran presentes en el combustible, independiente de la temperatura (Baukal 2001).

La norma NADF-017-AIRE-2017 para óxido de nitrógeno establece un LMP de 180 mg m⁻³; mientras que la norma de salud NOM-023-SSA1-1993 establece un LMP de 395 µg m⁻³ en una hora una vez al año.

1.6.4 Óxidos de azufre

El óxido de azufre que es emitido a la atmósfera en mayor cantidad es el SO₂, es un gas incoloro de olor picante, en los seres humanos ocasiona irritación en el sistema respiratorio (Carnicer, 2006). Este contaminante no se encuentra regulado en la norma de crematorios, sin embargo, la Secretaría de Salud en la NOM-022-SSA1-2010 proporciona un LMP de 288 µg m⁻³ promedio en 24 horas, una vez al año; 66 µg m⁻³ promedio anual y una concentración menor o igual a 524 µg m⁻³ en promedio horario dos veces al año.

1.7 Cuantificación de CO

Hay diferentes métodos para la determinación de gases emitidos a la atmósfera. Dependiendo de la finalidad de la medición, tipo de contaminante y origen es la técnica de muestreo que se empleará (Crespo, 2007).

Existe el analizador automático de CO por fotometría infrarroja (IR) estos se basan en la capacidad que tiene el CO para absorber energía en determinadas longitudes de onda. Este equipo mide la absorción de la luz infrarroja en intervalos pequeños de longitudes de onda. La luz se hace pasar por un filtro rotatorio que está compuesto por dos celdas, una de ellas tiene CO en alta concentración y la otra contiene como blanco N₂ para así poder crear el haz de referencia. La señal que emite el detector se acondiciona por microprocesadores para poder tener una lectura de concentración de CO (INECC, 2018).

También se encuentra el analizador de gases ORSAT, su operación se basa en la absorción de ciertos componentes y mediante un análisis volumétrico se determina su porcentaje en volumen, es el método más común empleado para la determinación de CO₂, O₂ y CO; comúnmente se utiliza el cloruro cuproso para la absorción de CO.

Para medir la concentración de CO también se utiliza la celda electroquímica. Los sensores electroquímicos se utilizan para determinar el contenido de un contaminante gaseoso estos funcionan con base en el principio de la valoración potenciométrica sensible a iones. Cada uno de los sensores es específico para la determinación de una sola sustancia, debido a que se basa en una reacción de óxido-reducción que sucede en presencia del gas que se desea medir. El cambio que se presenta en los estados de oxidación de las sustancias involucradas genera una diferencia de potencial eléctrico que es proporcional a la concentración de la sustancia que se está midiendo. Un procesador electrónico previamente calibrado traduce la diferencia de potencial a una diferencia de concentración respecto de la calibración.

Los sensores están rellenos con un electrolito acuoso específico, en el que están dispuestos dos o tres electrodos, igualmente combinados específicamente, entre los que se encuentra un campo eléctrico. Los sensores están sellados del exterior mediante membranas permeables al gas. El diseño y el funcionamiento de los sensores va a depender del componente del gas a medir.

1.8 Carbono orgánico y carbono elemental

1.8.1 Carbono orgánico

El carbono orgánico está clasificado en primario y secundario, el primero es generado durante la combustión incompleta, resuspensión de polvo y partículas biogénicas primarias, virus, bacterias, polen, esporas de hongos y desechos de tipo vegetal (Hildemann *et al.*, 1994); el carbono orgánico secundario es el producto de reacciones atmosféricas entre compuestos orgánicos volátiles con trazas de gases atmosféricos (O₃, OH[·], NO⁻³, NO⁻²) representando así una mezcla de cientos de compuestos orgánicos, y algunos de ellos presentan características mutagénicas y/o cancerígenas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, dibenzo-p-dioxinas policloradas y dibenzofuranos (Feng *et al.*, 2006; Huiji *et al.*, 2008).

1.8.2 Carbono elemental

De acuerdo con Petzold *et al.* (2013) el carbono elemental es el carbono negro determinado mediante métodos específicos con base a su composición química y el contenido de carbono que

presentan, es decir, se conoce como carbono negro cuando se determina por medio de un método óptico y carbono elemental cuando se utiliza un método químico. Para este trabajo de investigación siempre se utilizará el término carbono elemental (EC).

El carbono elemental en conjunto con el CO₂ se ha demostrado que son los principales contribuyentes del cambio climático (Bachmann, 2009). El carbono elemental también es un indicador de contaminación atmosférica. Tiene un tiempo de residencia menor a una semana en la tropósfera (Babu y Moorthy, 2001).

El EC contribuye al forzamiento radiativo positivo que origina el cambio climático, por medio de la absorción de luz en diferentes longitudes de onda (ICCT, 2009; SMA, 2010); proviene de la combustión incompleta de combustibles fósiles como aceite y/o petróleo y combustibles orgánicos tales como la biomasa, esto es ocasionado debido a que al tener temperaturas de entre 350-400°C el combustible se quema de manera incompleta (Magee Scientific, 2005). De acuerdo con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) la reducción de carbono elemental puede disminuir la tasa de calentamiento en los próximos dos a cuatro años, mientras se aborda el problema de las emisiones de CO₂ (PNUMA, 2008).

Se pueden encontrar diversos impactos del forzamiento radiativo como son aumentos de temperatura, modificación en los patrones de precipitaciones, y visibilidad en la superficie. El carbono elemental también reduce patrones de evaporación que dan origen a la formación de nubes; esto es debido a que la superficie de la Tierra se oscurece cuando se depositan partículas de carbono elemental. Por otro lado, se ve modificada la reflexividad de superficies brillantes, ya que en perfecto estado gran parte de la energía la reflejan hacia el espacio, pero las partículas de carbono elemental presentes en las superficies absorben parte de la energía reemitiéndola como calor. (ICCT, 2009).

El IPCC estima que el forzamiento radiativo total de carbono elemental es de 0.44 W m⁻² [±0.35], se encuentra catalogado como el segundo mayor contribuyente del calentamiento global, sólo después del CO₂ (Moreno, 2014; Mugica, 2012).

El EC se encuentra en las partículas finas ocasionando problemas a la salud, debido a que se deposita fácilmente en el sistema respiratorio permitiendo así que compuestos tóxicos se adhieran a él; cabe mencionar que no se cuenta con un límite permisible para su concentración (Kumar *et al.*, 2011).

Las fuentes principales de EC son la quema de biomasa, motores diésel para transporte y para uso industrial, así como los procesos industriales y todos aquellos que generan energía (Bond, 2007). Estas fuentes pueden ser estacionarias entre las que encontramos industrias y/o plantas generadoras de electricidad, o móviles donde se pueden incluir los tipos de transporte (vehículos, aviones, trenes o barcos).

En México para el año 1990 se estimó una emisión de EC de 70.4 gigagramos (Gg), aumentando un 48.5% para el año 2010 registrándose 104.5 Gg. Durante este período el sector energético contribuyó con un 85% de emisiones; dentro de este sector las fuentes que más aporte tuvieron fueron el transporte por consumo de diésel y el subsector residencial por la quema de leña (Inventario Nacional de Emisiones de Gses de Efecto Invernadero, 2018).

De acuerdo con el inventario de emisiones del año 2015, México emitió 112,240 toneladas de EC, sin embargo, el gas que más se emite en el país es el CO₂ representando el 71% de las emisiones. Durante el mes de diciembre del año 2015 se llevó a cabo la conferencia de las partes (COP21) en París; donde México hace el compromiso de reducir un 51% las emisiones de carbono elemental (carbono negro) y un 22% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); todo esto con una proyección hacia el año 2030 (SEMARNAT,2014).

AIDA (2009) brinda cuatro oportunidades y razones para la regulación de carbono elemental:

- i. La disminución de carbono elemental ofrece beneficios climáticos, pero al mismo tiempo en la salud del ser humano y la productividad agrícola.
- ii. Las tecnologías para la disminución de carbono son de bajo costo.
- iii. Minimizar carbono elemental compensa emisiones de CO₂ hasta por 20 años.
- iv. La vida del carbono elemental
- v. en la atmósfera es corta, por lo que regularlo mostraría resultados en cuestión de semanas.

1.9 Cuantificación de carbono orgánico y carbono elemental

1.9.1 Método termo-óptico (Transmitancia termo-óptica, TOT por sus siglas en inglés)

Este método emplea un analizador térmico-óptico utilizando diferentes rampas de calentamiento y enfriamiento para cuantificar todas las especies involucradas en el carbono total. El carbono que se encuentra en el filtro se oxida como CO₂ para después reducirlo a metano y finalmente medirlo por un detector de flama de ionización (Peterson, 2002).

1.9.2 Reflectancia Termo-óptico (TOR por sus siglas en inglés)

Este método está basado en la propiedad del carbono de reemitir la luz, utiliza diferentes temperaturas para cuantificar OC y EC mediante un calentamiento progresivo permitiendo separar el carbono en ocho fracciones: tres de EC y cinco de OC (Han *et al.*, 2007).

El OC en este método es aquel que no se absorbe en una longitud de onda del láser y el EC es todo el restante (Chow *et al.*, 2007).

1.9.3 Oxidación térmica con dióxido de manganeso

Al igual que TOT y TOR este método tiene bases térmicas, sin embargo, después de oxidar el carbono a CO₂ en una temperatura de 921°C, la muestra se coloca con dióxido de manganeso (MnO₂) para reducirlo a metano con un catalizador de níquel; finalmente se cuantifica con el detector de flama de ionización (Chow *et al.*, 2007).

1.10 Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's)

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y sus derivados se encuentran en el ambiente siendo el producto de diversos procesos industriales y de combustión. Su nombre "hidrocarburos" es debido a que están compuestos fundamentalmente por carbono e hidrógeno. Por otro lado, el benceno cuyo olor es muy característico hace que todos los compuestos derivado del anillo bencénico se denominen aromáticos. Y finalmente el carácter de policíclicos es debido a que la mayoría de los compuestos poseen diversos anillos (Soriano, 2009; Agudo, 2010).

De acuerdo con Thiele y Brummer (2002) la principal fuente de hidrocarburos en el ambiente es la combustión de materiales orgánicos. Dentro de las principales fuentes naturales de emisión de los HAP's están los incendios forestales y las erupciones volcánicas (Duan *et al.*, 2007); la contribución que tienen dichas fuentes es mínima en comparación con las emisiones provenientes de actividades antropogénicas. La pirolisis y la pirosíntesis son los principales mecanismos formadores de HAP's (Björseth y Ramdahl, 1985).

Los HAP's son compuestos químicamente estables, solubles en disolventes orgánicos, hidrofóbicos; presentan puntos de ebullición que varían de los 200°C a 570°C mientras que su punto de fusión va de los 80°C a 400°C (Sagrado *et al.* 2003). A pesar de que en el ambiente existen más de 500 especies de hidrocarburos; 16 son denominados por la EPA como "HAP's prioritarios" (Figura 6) por sus propiedades mutagénicas, carcinogénicas y teratogénicas (Zhang *et al.* 2006; Morillo *et al.* 2008).

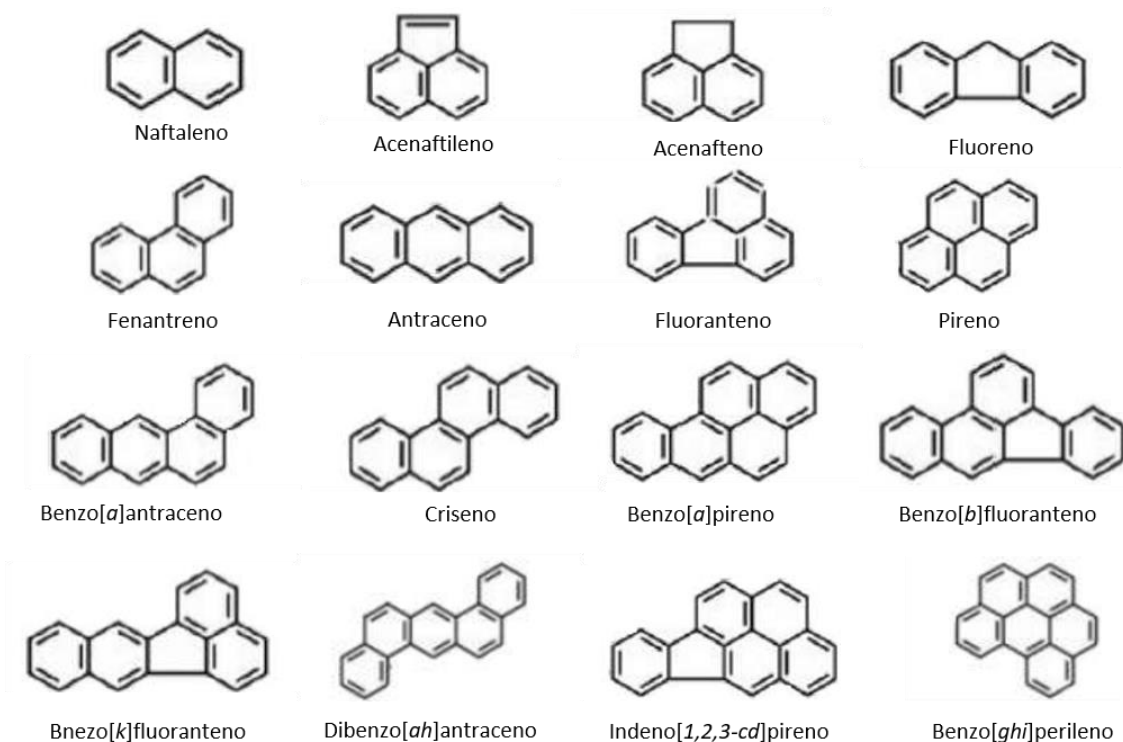


Figura 6. Estructuras de los 16 HAP's considerados como prioritarios

Los HAP's de dos o tres anillos aromáticos, es decir, de bajo peso molecular se dispersan a través de la atmósfera y los de cuatro a siete anillos aromáticos (mayor peso molecular) presentan afinidad por las partículas siendo así más persistentes en el medio ambiente (Ma *et al.* 2005; Cai *et al.* 2008; Maliszewska *et al.* 2009).

La característica principal que presentan los HAP's sobre los daños a la salud, es su capacidad para inducir la formación de cáncer en los organismos expuestos. Hay que recalcar que todos los HAP's son sospechosos de ser carcinogénicos ya sea en un grado o en otro, aunque tengan un nivel bajo (Gúzman, 2009).

El benzo[a]pireno es el principal marcador de HAP's ya que este se encuentra presente en la mayoría de las fuentes, teniendo una vida media en el suelo de 162 días. De acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) este compuesto se ha clasificado dentro del Grupo 1, es decir, es conocido como carcinógeno humano (IARC,2010).

1.11 Cuantificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos

1.11.1 Cromatografía de gases

Esta técnica consiste en arrastrar un soluto gaseoso o un líquido volátil por medio de una fase móvil gaseosa; en conjunto con una fase estacionaria; para la cuantificación de HAP's el gas empleado es helio (Rojas *et al.*, 2011). La conductividad térmica, ionización de llama, captura electrónica y espectrometría de masas son los detectores que puede utilizarse en la cromatografía de gases. Para HAP's la espectrometría de masas es la más empleada, aunque otras investigaciones indican que también se emplea un detector de ionización de llama (Lim *et al.*, 2007).

La espectrometría de masas por su parte está basada en la ionización de las moléculas gaseosas, estas son aceleradas en un campo eléctrico y separadas de acuerdo a su masa. El impacto de electrones permite el proceso de ionización suministrando energía para que las moléculas se dividan en fragmentos (Schofield, 2008).

1.11.2 Cromatografía de líquidos

El detector empleado en esta técnica para la cuantificación de HAP's es el detector por fluorescencia. En un equipo común la muestra es golpeada por una radiación proveniente de una lámpara de Xe que pasa a través de un filtro o monocromador. Una parte de la radiación se absorbe en la muestra y la radiación restante se emite en un segundo monocromador.

Los detectores están basados en la capacidad que contienen las muestras de absorber luz de una determinada longitud de onda (Hernández, 2013).

1.12 Metales

La palabra metal suele utilizarse para nombrar una gran cantidad de elementos cuyas masas atómicas están entre 63 y 201 uma (unidad de masa atómica). Clasificándolos de manera más general estos pueden ser metales y metaloides. Los metales se encuentran en su forma más elemental o como iones disueltos en agua.

Pueden ser emitidos a la atmósfera desde una fuente natural y antropogénica. Los de origen natural son incorporados a la atmósfera como un producto de la erosión; mientras que los de origen antropogénico son aquellos emitidos en procesos de combustión de combustibles fósiles y biomasa, en actividad minera y/o en la fabricación de ladrillos (Román Pérez, 2013).

Entre los metales que podemos encontrar durante la cremación está el mercurio (Llobet *et al.*, 2002). El mercurio es el trigésimo sexto elemento más abundante en el cuerpo; sin embargo, también se tiene una fuente antropogénica; la amalgama dental, que tiene alrededor de 0.5 g de mercurio. Las altas temperaturas del horno provocan que el metal proveniente de la amalgama se volatilice y se sume al mercurio presente en el cuerpo, dando origen a la emisión de Hg. Estudios han reportado hasta 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ de mercurio emitidos en un servicio de cremación (DEFRA, 2003).

Por otro lado, el cadmio es parte de la composición natural de rocas y suelos provocando una liberación al medio ambiente cercana a 25,000 toneladas por año. Este metal ingresa al cuerpo humano por vía respiratoria o por vía oral, es transportado por la sangre y se concentra en el hígado y riñón; tiene la capacidad de acumularse en estos órganos ocasionando daños irreversibles aún en concentraciones mínimas. (Reyes *et al.*, 2016).

Al igual que el cadmio el plomo ingresa al ser humano vía respiratoria (inhalación), por ingesta o a través de la piel. El plomo se distribuye a diferentes órganos donde se acumula con el paso del tiempo; la intoxicación por plomo va a variar dependiendo de la edad de la persona y el nivel de exposición (Bayona, 2009).

1.13 Cuantificación de metales

La espectrofotometría atómica consiste en un conjunto de técnicas que están basadas en la absorción o emisión de haces de luz a distintas longitudes de onda.

1.13.1 Espectrofotometría por horno de grafito

En esta técnica se emplea un fuerte calentamiento de una resistencia eléctrica para atomizar una alícuota de muestra. Se llevan a cabo varias etapas: secado, mineralización y atomización. La temperatura y la duración de cada etapa va a depender del tipo de muestra.

1.13.2 Espectrofotometría por generador de hidruros

Esta técnica se utiliza para determinar elementos altamente volátiles. El proceso consiste en acidificar la muestra con la finalidad de generar el hidruro. Las reacciones se llevan a cabo en el generador de hidruros, la muestra se introduce mediante una bomba peristáltica, el elemento a cuantificar es transportado hacia una celda de cuarzo donde se incide luz (Martínez, 2017).

CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO

CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Identificación de crematorios a muestrear en la Ciudad de México

De acuerdo con la información proporcionada por la SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente), en la Ciudad de México se encuentran instalados y en operación alrededor de 40 hornos crematorios (SEDEMA, 2017) (Figura 7, a). Se realizaron visitas a varios de los hornos de los cuales se eligieron 3 de grupo Gayosso, esto con base al número de servicios que realizaban, ya que eran los que más servicios brindaban por día; con estas visitas se verificó la capacidad del horno, tiempo de operación, características de los hornos, número y horarios de servicio.

Por acuerdos de confidencialidad no se nombrarán las direcciones ni los nombres de los crematorios muestreados, y se denominarán como crematorio 1, crematorio 2 y crematorio 3. En la Tabla 4. se muestran las características de operación de cada uno de los crematorios seleccionados, así como el promedio de servicios realizados por día.

Tabla 4. Características de operación de hornos crematorios

HORNO CREMATORIO	CAPACIDAD DE 1 ^{er} CÁMARA	COMBUSTIBLE AUXILIAR EMPLEADO	CONSUMO APROXIMADO DE COMBUSTIBLE MENSUAL*	PROMEDIO DE SERVICIOS POR DÍA
1	1,750,000 BTU/hr	Gas LP	10.73 m ³	6
2	2,000,000 BTU/hr		9.56 m ³	6
3	2,000,000 BTU/hr		10.15 m ³	6

* El aproximado de combustible mensual se obtuvo en base al valor proporcionado de lo consumido durante el año 2016.

En el crematorio 1 la duración del servicio es de aproximadamente 120 minutos, mientras que en el crematorio 2 y crematorio 3 los servicios duran entre 60 y 70 minutos; esto debido a que los quemadores de los hornos anteriormente mencionados son de mayor tamaño. Cabe señalar que ninguno de los tres hornos crematorios cuenta con equipos de control de emisiones de partículas, sin embargo, para el control de gases cuentan con una cámara secundaria con una temperatura mínima de 850°C y un tiempo de residencia de 2 segundos.(Figura 7, b).

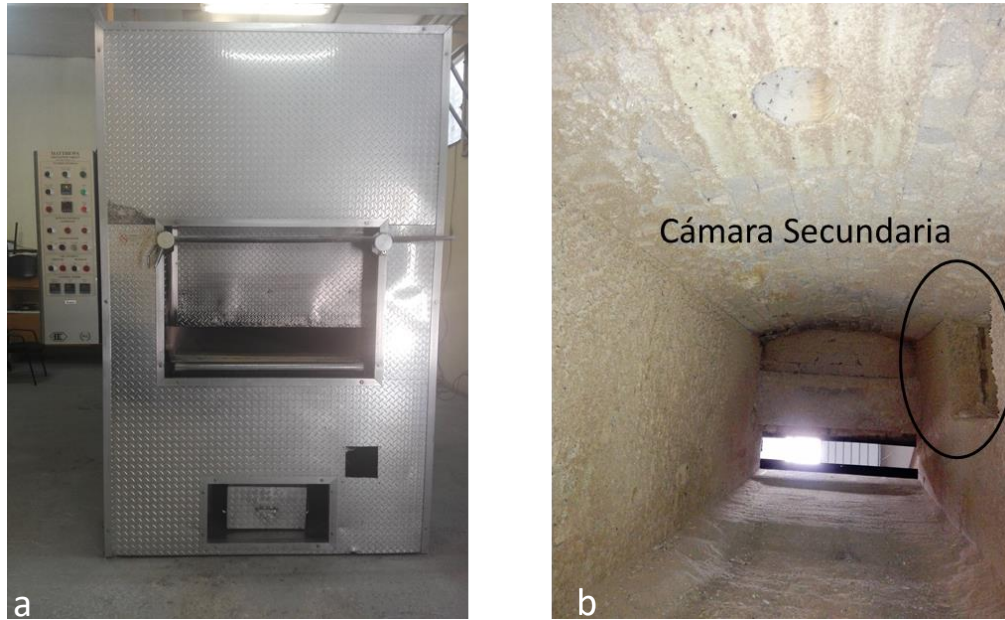


Figura 7. a. Horno crematorio visto desde afuera, b. Horno crematorio visto desde adentro (círculo indica ubicación de cámara secundaria)

Los tres crematorios tienen una chimenea de 5 m de altura con un diámetro externo de 70 cm y un diámetro interno de 50 cm (Figura 8), la cantidad de puntos a muestrear se hicieron conforme a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-009-SCFI-1993 donde indica que el número de puntos a muestrear está relacionado con la distancia corriente abajo y corriente arriba después de la perturbación en la chimenea. Para el muestreo de $PM_{2.5}$ y PST en los tres hornos crematorios se muestrearon 12 puntos debido a que cumplían las alturas establecidas en la norma mencionada.



Figura 8. Chimenea con puertos y plataforma de muestreo

Las visitas a los hornos crematorios permitieron observar las variables que afectaban el proceso de cremación como: marca del horno, si su funcionamiento es manual o automático, el peso del cuerpo, género, edad, se considera también si el cuerpo a cremar contiene o no implantes y/o marcapasos, así como el tipo de ropa que lleva puesta en el momento de la cremación, el número de servicios que realiza el horno y la fecha en la que cada horno inicio sus operaciones o su reparación. El pesaje de los cuerpos se llevaba a cabo por diferencia, primero se realizaba el peso del ataúd con el cuerpo (Figura 9) y una vez ingresado el cuerpo al horno se volvía a pesar el ataúd; la diferencia entre estos pesos permitía conocer el peso del cuerpo.



Figura 9. Pesaje del cuerpo

2.2 Recolección y cuantificación de partículas PM_{2.5} y PST

Para coleccionar las partículas PM_{2.5} se emplearon filtros de cuarzo con un diámetro de 47 mm, se colocaron en un desecador con el fondo cubierto con silica gel con el objetivo de mantener constante la humedad y al mismo tiempo el peso. Previo a esto se colocaron en una estufa durante seis horas a una temperatura de 650°C, esto con la finalidad de eliminar humedad y materia orgánica que pudieran contener. Finalmente fueron pesados dentro de un espacio controlado (balanza Mettler Toledo modelo MT15) y puestos dentro de una bolsa ziploc etiquetada con anterioridad y de manera individual.

En los tres hornos crematorios la obtención de la muestra representativa se obtuvo con base en el Método 201 A de la EPA, para los 3 hornos crematorios se tuvo un tiempo de muestreo de 60 minutos; los flujos promedio en cada uno de ellos fueron los siguientes:

- i. Horno Crematorio 1, 2761.17 m³ hr⁻¹
- ii. Horno Crematorio 2, 1191.89 m³ hr⁻¹
- iii. Horno Crematorio 3, 2364.66 m³ hr⁻¹

Los flujos en cada uno de los hornos son diferentes ya que la capacidad del quemador de la primer cámara de cremación es distinta entre ellos siendo de 750,000 BTU/hr en el horno 1 y de 1,000,000 BTU/hr en los hornos 2 y 3; mientras que la capacidad del quemador de la segunda cámara es la misma en los tres hornos (1,000,000 BTU/hr). En cada uno de los muestreos realizados fueron registrados el peso, género, enfermedades y causa de muerte del cuerpo a cremar, la temperatura del horno cada 10 minutos, así como la temperatura que se tenía a la salida de la chimenea. Para realizar el muestreo se utilizó el equipo isocinético Marca Seelin, Modelo FF-0012, Serie 0024 (Figura 10), y un ciclón de 2.5 μm Marca Apex (Figura 11). Para los tres hornos crematorios y basándonos en la NMX-AA-009-SCFI-1993 se tomaron en el puerto de muestreo 12 puntos transversales con cinco minutos de intervalo entre cada uno de ellos hasta cubrir 60 minutos; esto con la finalidad de determinar el perfil de velocidades en cada uno de los hornos crematorios.



Figura 10. Consola del muestreador isocinético, Marca Seelin, Modelo FF-0012, Serie 0024



Figura 11. Ciclón de 2.5 μm

El contenido de humedad en el proceso de combustión se calculó mediante el método gravimétrico, es decir, con la diferencia de pesos de los impactadores del equipo isocinético al inicio y al final del muestreo (Figura 12). Todo esto se realizó con base en lo señalado en el punto 1.4.1.3 del presente trabajo. El equipo cuenta con un total de 4 impactadores cuya distribución es la siguiente: a los impactadores 1 y 2 se les adiciona 100 mL de agua destilada, el impactador 3 es de vacío y finalmente a el impactador 4 se le agregó aproximadamente 250 g de silica gel; estos están contenidos dentro de una caja fría con hielo para condensar el agua que proviene de la corriente gaseosa.



Figura 12. Caja fría con impactadores

Adicional a esto se midió el volumen y gasto del gas muestreado a condiciones estándar y normales utilizando un gasómetro que viene integrado en la consola del equipo isocinético, viscosidad, número de Reynolds, diámetro de corte, coeficiente de Cunningham, y velocidad de gas en la boquilla; estos cálculos se desarrollaron en hojas de cálculo en Excel a lo largo de todos los muestreos realizados, de acuerdo con el Método 201 A de la EPA.

Los filtros después del muestreo se colocaron en cajas Petri, selladas con parafilm y se cubrieron con papel aluminio para ser colocados en un desecador. Posteriormente se pesaron nuevamente los filtros para obtener una diferencia de pesos perteneciente al peso de las partículas $PM_{2.5}$ emitidas por la actividad de cremación de cadáveres humanos.

Para la colección de PST se utilizaron filtros de fibra de vidrio de aproximadamente 10 cm de diámetro, para realizar el acondicionamiento de estos filtros antes de coleccionar la muestra se colocaron en un desecador con el fondo cubierto con sílica gel con el objetivo de mantener constante la humedad y al mismo tiempo el peso. Previo a esto se colocaron en una estufa durante ocho horas a una temperatura de $300^{\circ}C$, esto con la finalidad de eliminar humedad. Finalmente

fueron pesados dentro de un espacio controlado y puestos dentro de una bolsa ziploc etiquetada con anterioridad y de manera individual. Estos filtros fueron utilizados para la determinación de HAP's. Para la colección de estas partículas fue necesario añadir al tren de muestreo la caja caliente manteniéndola a una temperatura de 120°C.

En los tres hornos crematorios la obtención de la muestra representativa se obtuvo con base en el Método 5 de la EPA, para los 3 hornos crematorios se tuvo un tiempo de muestreo de 60 minutos.

En resumen, la Tabla 5 muestra el número de muestreos que se realizó por cada horno crematorio.

Tabla 5. No. de muestreos realizados por horno crematorio

No. Muestras	Horno Crematorio			Total
	1	2	3	
PM _{2.5}	12	20	10	42
PST	4	6	6	16

2.3 Cuantificación de emisiones de CO

Para la cuantificación de gases de combustión se utilizó el método US EPA 030 empleando la celda electroquímica Marca Bacharach, Modelo Insight Plus que se observa en la Figura 13, este equipo incluye sensores para poder monitorear los gases de combustión como oxígeno y monóxido de carbono de manera efectiva y precisa (ICON, 2018). Esta medición se llevaba a cabo en el puerto de muestreo de la chimenea en el minuto treinta del muestreo, y se realizaron 20 mediciones con un intervalo de aproximadamente 30 segundos entre cada una de ellas.



Figura 13. Celda electroquímica Bacharach

2.4 Cuantificación de carbono elemental y carbono orgánico

La cuantificación de carbono elemental y carbono orgánico contenido en las partículas $PM_{2.5}$ se llevó a cabo por el método termo-óptico NIOSH 870 con el analizador Sunset Laboratory que se observa en la Figura 14. Para esta prueba se insertó en el equipo un área aproximada de 1 cm^2 de cada uno de los filtros de cuarzo empleados en los muestreos.



Figura 14. Analizador de carbono elemental y carbono orgánico modelo Sunset Laboratory

Los filtros de cuarzo son carbonizados con temperaturas de hasta 800°C . Al iniciar el método el filtro es calentado a 650°C en ausencia de oxígeno con la finalidad de volatilizar el OC presente en la muestra (Figura 15). Se inyecta helio para realizar la combustión del EC y la temperatura es reducida. Posteriormente se adiciona oxígeno al gas de acarreo ($\text{O}_2 + \text{He}$). Los compuestos desorbidos son oxidados a CO_2 para después reducirse a CH_4 . Los dos compuestos son cuantificados en un detector de ionización de llama.



Figura 15. Filtro de cuarzo impregnado con partículas

La temperatura se incrementa nuevamente entre 750 y 800°C para oxidar el EC. Finalmente una cantidad conocida de CH_4 es introducida para realizar una calibración de forma interna.

La masa total de OC y EC se calcula multiplicando las concentraciones por el área del filtro.

2.5 Cuantificación de hidrocarburos aromáticos políciclicos (HAP's)

Para el análisis de los HAP's se empleó 1/8 del filtro (fibra de vidrio) (Figura 16) porque en análisis preliminares se observó que era suficiente para llevar a cabo la extracción de los mismos. El filtro se fortificó con 50 μL de una solución de diez HAP's deuterados (Tabla 6) a una concentración de 30-500 ng mL^{-1} ; se empleó esa concentración porque en análisis preliminares los HAP's se encontraban dentro de este rango.

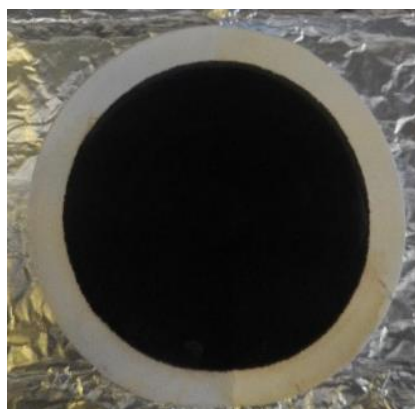


Figura 16. Fotografía de filtro impregnado con partículas

Tabla 6. HAP's deuterados con sus respectivos iones, tiempo de retención y masa adicionada en los 50 μL , empleados para la cuantificación de HAP's.

No.	NOMBRE	ABREVIATURA	ION PRIMARIO	TIEMPO DE RETENCIÓN (min)	MASA ADICIONADA EN 50 μL (ng)
1	Naftaleno-d8	Naf-d8	136	5.583	30
2	Acenafteno-d10,	Acno-d10	164	10.271	150
3	Fenantreno-d10,	Fen-d10	188	16.056	
4	Criseno-d12,	Cris-d12	240	28.111	
5	Perileno-d12	Per-d12	264	34.206	
6	Fluoranteno-d10	Flt-d10	212	21.390	500
7	Pireno-d10	Pir-d10	212	22.329	500
8	Benzo[b]fluoranteno-d12	BbF-d12	264	32.652	500
9	Benzo[a]pireno-d12	BaP-d12	264	33.891	150
10	Benzo[g,h,i]perileno-d12	BghiP-d12	288	38.795	500

El procedimiento para realizar la cuantificación de los HAP's se describe a continuación:

2.5.1 Extracción

Para extraer los compuestos orgánicos de las PST, los filtros ya fortificados se colocaron en matraces Erlenmeyer de 125 mL, posterior a ello para la primera extracción se le adicionaron 20 mL de diclorometano para cubrir todo el 1/8 de filtro empleado, en la segunda extracción únicamente se agregaron 10 mL de diclorometano (Figura 17).

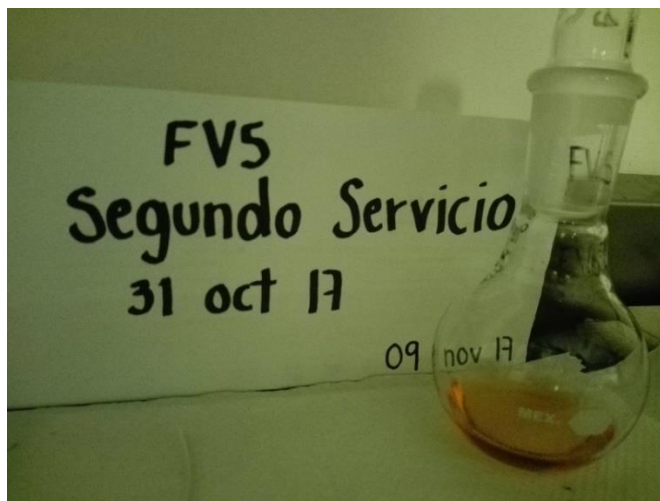


Figura 17. Extracción finalizada

Las muestras se colocaron en un baño ultrasónico, marca Branson, Modelo 2510, acoplado a un sistema de refrigeración con el fin de evitar que el diclorometano grado HPLC se evaporara y se perdiera junto con los compuestos orgánicos. El período de extracción fue de 30 minutos a una temperatura de 60°C (Figura 18).



Figura 18. Baño ultrasónico

Se llevaron a cabo dos extracciones de cada uno de los compuestos de interés. Posterior a las extracciones se dejaron enfriar las muestras para continuar con la reducción.

2.5.2 Reducción

El extracto se colocó en matraces de bola esmerilados y mediante un rotavapor marca Buchi, modelo 461 a una temperatura de 30°C y una presión de vacío de 5 pulgadas se realizó la reducción, con la finalidad de concentrar las muestras a un volumen aproximado de un mililitro.

2.5.3 Filtración

Los concentrados se filtraron mediante acrodiscos (PTFE 0.22 μm) en matraces aforados de 1 mL realizando dos enjuagues para evitar pérdidas del extracto, se adicionó a este 100 μL de un estándar interno que contenía benzo[*a*]antraceno-d12 con una concentración de 200 ng. Una vez aforado en el matraz, estos se traspasaron a un vial de inyección color ámbar de 1 mL para su análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas CG-EM.

Para determinar la eficiencia en la extracción de HAP's-d se calcularon los porcentajes de recuperación (% R), la desviación estándar y los coeficientes de variación (C.V) para los 10 HAP's deuterados (Tabla 7). La masa adicionada fue de 30, 150 y 500 ng; se obtuvieron porcentajes de recuperación entre 61 \pm 18 y 78 \pm 29 (N=16). El método TO-13A de la EPA establece que cualquier procedimiento analítico cuyos porcentajes de recobro de HAP's se encuentren dentro del rango 60 y 120% es un método adecuado para su determinación.

Tabla 7. Promedio, desviaciones estándar, coeficientes de variación y masa adicionada de porcentajes de recuperación de HAP's deuterados (N=16)

HAP-d	% R	Desviación estándar	C.V	Masa adicionada (ng)
Naftaleno-d8	71	29	41	30
Acenafteno-d10	67	24	36	150
Fenantreno-d10	68	23	34	150
Fluoranteno-d10	67	22	33	500
Pireno-d10	69	22	33	500
Criseno-d12	67	24	36	150
Benzo[<i>b</i>]fluoranteno-d12	68	23	33	500
Benzo[<i>a</i>]pireno-d12	76	27	36	150
Perileno-d12	78	28	36	150
Benzo[<i>ghi</i>]perileno-d12	61	18	30	500

2.5.4 Análisis por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas

Los HAP's se analizaron en un cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo HP 6890 (Figura 19) acoplado a un espectrómetro de masas HP 5973. En base a los iones primarios y secundarios de cada uno de los compuestos se pudo determinar el tiempo de retención de los HAP's.



Figura 19. Cromatógrafo de gases modelo 6890 plus acoplado a un espectrómetro de masas HP 5973

Las condiciones de operación del método cromatográfico se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Condiciones de operación del análisis cromatográfico.

	Parámetro	Condiciones de operación
Inyector	Volumen inyectado	1 µL
	Modo	Splitless
	Gas de acarreo	Helio
	Temperatura	300 °C
	Flujo total	6.2 mL/min
Columna	HP-5MS 5% Phenyl Methyl Siloxone, longitud 30 m, diámetro 250 µm y espesor 0.25 µm	
Rampa de Temperatura en el horno	T ₀	40°C
	Tiempo de permanencia	1 min
	T ₁	120 °C
	Velocidad	50 °C/min
	T ₂	305°C
	Velocidad	5 °C/min
	T ₃	330 °C
	Velocidad	20 °C
	Tiempo de permanencia	6 min
Tiempo total de corrida	47.85 min	
EM	Temperatura de cuádruplo	150°C
	Temperatura de fuente de ionización	230°C

La cuantificación de los 20 HAP's (naftaleno, acenafteno, fenantreno, fluoranteno, pireno, benzo[a]antraceno, criseno, benzo[b]fluoranteno, benzo[a]pireno, perileno, benzo[ghi]perileno, 2-metilnaftaleno, acenaftileno, fluoreno, antraceno, reteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[e]pireno, indeno[1,2,3-cd] pireno y dibenzo[a,h]antraceno) se realizó por dilución isotópica.

2.6 Cuantificación de metales

La cuantificación de los metales se hizo mediante un espectrofotómetro de absorción atómica (GBC 932AA) acoplado a un generador de hidruros (GBC HG3000) para As y Hg, y para cuantificar Cd, Pb y V se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica (GBC-VANTA SIGMA) los dos equipos fueron controlados mediante computadora.

La Tabla 9 muestra las condiciones de operación del espectrofotómetro, y la Tabla 10 los parámetros de calibración.

Tabla 9. Condiciones de operación de espectrofotómetro

Elemento	Hg
Lámpara	Cátodo Hueco
Intensidad de Corriente	3 mA
Longitud de Onda	253.7 nm
Slit Width	0.5 nm
Slit Height	Normal
Modo de medición	Integración
Introducción de la muestra	Manual
Tiempo de lectura	3 segundos
Réplicas	Tres

Tabla 10. Parámetros de Calibración

Modo de calibración	Método lineal de los mínimos cuadrados
Unidades	Ppb ($\mu\text{g/l}$)
Número de decimales	3
Límite de R^2	0.995
Blanco después de la calibración	No

Para la cuantificación de metales se utilizó 1/8 de filtro de fibra de vidrio, los cuales fueron digeridos en un horno de microondas modelo CEM de placa giratoria y extracción de gases, con control automático de temperatura, presión y potencia. Cada muestra se colocó en un vaso de digestión de teflón donde se le adicionaron 10 ml de HNO_3 concentrado ultra puro y se dejaron reposar para su posterior digestión en frío. Finalmente se digirieron en el horno de microondas.

2.7 Determinación del Factor de Emisión de las emisiones de partículas PM_{2.5}, carbono elemental y carbono orgánico, CO, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales provenientes de hornos crematorios.

Los factores de emisión (FE) de las emisiones provenientes de hornos crematorios se estimaron tomando en cuenta: volumen muestreado, volumen total, masa del cuerpo cremado y la concentración de los contaminantes.

Los FEs de partículas PM_{2.5} se determinaron en función de la masa de partículas colectadas en el filtro (M_p), el peso del cuerpo cremado (P_c), volumen muestreado (V_m) y el volumen total durante el muestreo (V_t), como lo indica la ecuación 1.

$$FE PM_{2.5} = \frac{\left(\frac{M_p}{V_m}\right) * V_t}{P_c} \quad \text{Ecuación 1}$$

Los FE de carbono elemental y carbono orgánico se determinaron con base en la concentración de carbono negro y carbono elemental (CC), área del filtro impregnada de partículas (A), volumen muestreado (V_m), volumen total durante el muestreo (V_t) y el peso del cuerpo cremado (P_c), (Ecuación 2).

$$FE OC o CN = \frac{[CC] * A * \left(\frac{V_t}{V_m}\right)}{P_c} \quad \text{Ecuación 2}$$

Los FE de monóxido de carbono se determinaron en función de la concentración del gas obtenida en los muestreos (C_g), masa molecular del gas (PM), la constante de los gases ideales (R), presión (P), temperatura (T), volumen total (V_t) y el peso del cuerpo cremado (P_c), como se plantea en la Ecuación 3.

$$FE CO = \frac{PM * C_g * V_t}{P_c * \frac{RT}{P}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Los FE de HAP's se determinaron en función a la masa del HAP obtenida en el método cromatográfico (M_{HAP}), el volumen muestreado (V_m), volumen total durante el muestreo (V_t) y el peso del cuerpo cremado (P_c), (Ecuación 4).

$$FE HAP = \frac{\left(\frac{M_{HAP}}{V_m}\right)}{P_c} * V_t \quad \text{Ecuación 4}$$

Finalmente, los FE de metales se determinaron en función de la masa de los metales (M_{met}), el volumen muestreado (V_m), volumen total durante el muestreo (V_t) y el peso del cuerpo cremado (P_c) (Ecuación 5).

$$FE MET = \frac{\left(\frac{M_{met}}{V_m}\right)}{P_c} * V_t \quad \text{Ecuación 5}$$

Se calculó la incertidumbre de los FE (I_{FE}) mediante la incertidumbre combinada (Ecuación 6), que a su vez está en función de la incertidumbre relativa de:

- i. Concentración de los contaminantes evaluados (U_C)
- ii. Volumen total durante el muestreo (V_t)
- iii. Volumen muestreado (V_m)
- iv. Peso del cuerpo (P_c)

$$I_{FE} = \sqrt{U_C^2 + V_t^2 + V_m^2 + P_c^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Como dato adicional para los tres diferentes hornos se realizó el cálculo de la eficiencia modificada de la combustión (MCE, por sus siglas en inglés) que es la cantidad de carbón (C) que se libera como CO_2 , sin tomar en cuenta el contenido de C de los HAP's y partículas atmosféricas. Se empleó la siguiente ecuación:

$$MCE = \frac{\Delta C_{CO_2}}{\Delta C_{CO_2} + C_{CO}}$$

Donde:

ΔC_{CO_2} = CO_2 combustión – CO_2 ambiente

C_{CO} = Concentración de CO

2.8 Tratamiento de datos

Para el análisis estadístico se utilizó el software IBM SPSS Statistics 20. Se utilizó estadística básica para determinar promedio, valor máximo, mínimo y desviación estándar de las emisiones de PST en los tres hornos crematorios; también se empleó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney para evaluar las medianas. Se utilizó la correlación de Spearman para determinar la dependencia de las variables consideradas con las emisiones a la atmósfera.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Observaciones durante la toma de muestras

Durante la realización de los muestreos se tuvo la oportunidad de observar de cerca el proceso de cremación y aunque la actividad siempre se desarrolla de la misma manera: recibimiento de cuerpo, actividad de embalsamamiento, velación, cremación y entrega de cenizas, la forma en la que los operarios operan el horno varía de persona a persona ya que no contaban con procedimientos de operación.

Se observó que dependiendo del operador del horno era la cantidad de veces que la compuerta del mismo era abierta, esto con la finalidad de agrupar los restos y que se pudiera completar la cremación o únicamente para corroborar que la combustión del cuerpo se estaba llevando a cabo de manera correcta. Esto ocasionó que la cantidad de aire que ingresaba a la cámara de cremación variara entre servicio y entre operarios.

Los mismos operarios nos indicaron que la emisión de humo que observaban en la chimenea variaba dependiendo del servicio que estuvieran realizando, sin embargo, eso no pudo corroborarse con la estadística, por otro lado, comentaron que dos de los hornos tenían menor eficiencia al tener otro tipo de tecnología, lo que quedó descartado al determinar la eficiencia de combustión de los hornos.

3.1 Concentración de PST y PM_{2.5}

Las Figuras 20, 21 y 22 muestran las concentraciones de PST emitidas en el horno crematorio 1, 2 y 3 respectivamente; de acuerdo con la norma NADF-017-AIRE-2017 estos datos fueron corregidos al 11% de O₂ en base seca; esta corrección se realiza para poder estandarizar los datos y de esta manera puedan ser comparados con la normatividad. Las gráficas indican la fecha en la que fue realizado el muestreo, el número en cada columna indica el servicio del que se trata.

La concentración promedio del horno crematorio 1 fue de 65.35 mg m⁻³. En el primer muestreo del día 11 de enero se observa un aumento significativo en la concentración de partículas, esto pudo deberse a que fue el primer muestreo realizado después de que la chimenea recibiera mantenimiento después de haber sufrido daños durante el temblor ocurrido en meses anteriores (19 de septiembre de 2017) generando mayor acumulamiento de partículas en el tiro de la chimenea. Con base en la norma antes mencionada se observa que el 50% de las emisiones excede el límite máximo permisible de partículas (40 mg m⁻³), por lo que se requiere el diseño y la instalación

de un equipo de control. Únicamente se realizaron cuatro muestreos en este horno debido a que estaba reanudando el servicio y el número de cremaciones aún no se normalizaba.

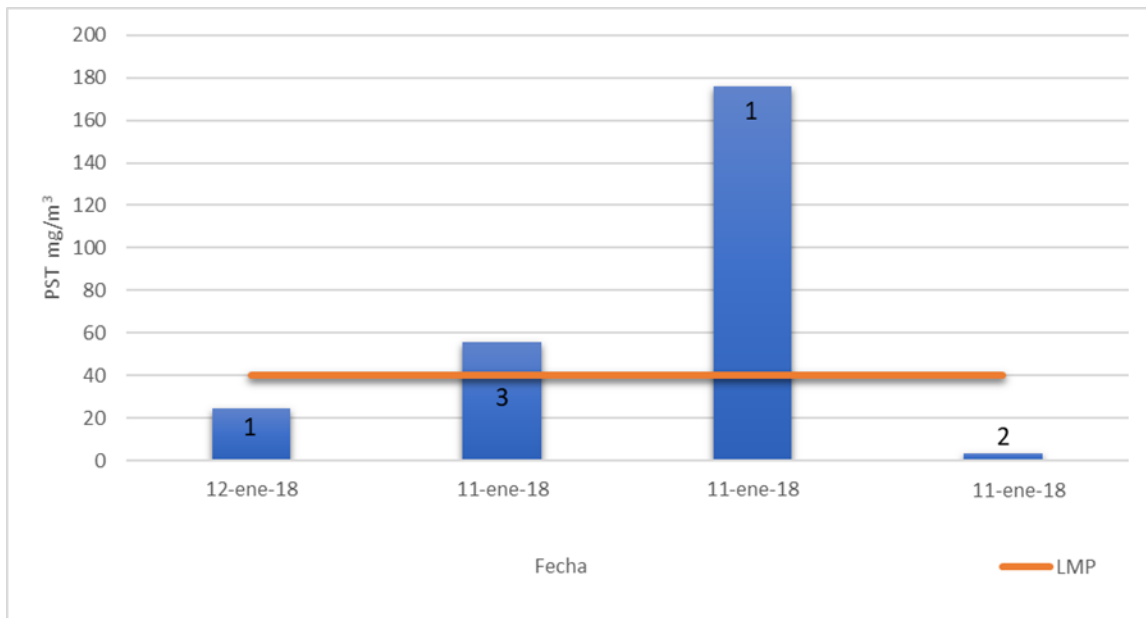


Figura 20. Concentración de PST de Horno Crematorio 1

En el horno crematorio 2 se llevaron a cabo 6 muestreos de PST obteniendo una concentración promedio de 52.74 mg m⁻³, sobrepasando en un 50 % el límite máximo permitido por la norma (40 mg m⁻³). La baja emisión de partículas en la primer cremación del día 26 de octubre de 2017 se debe a un error durante la realización del muestreo.

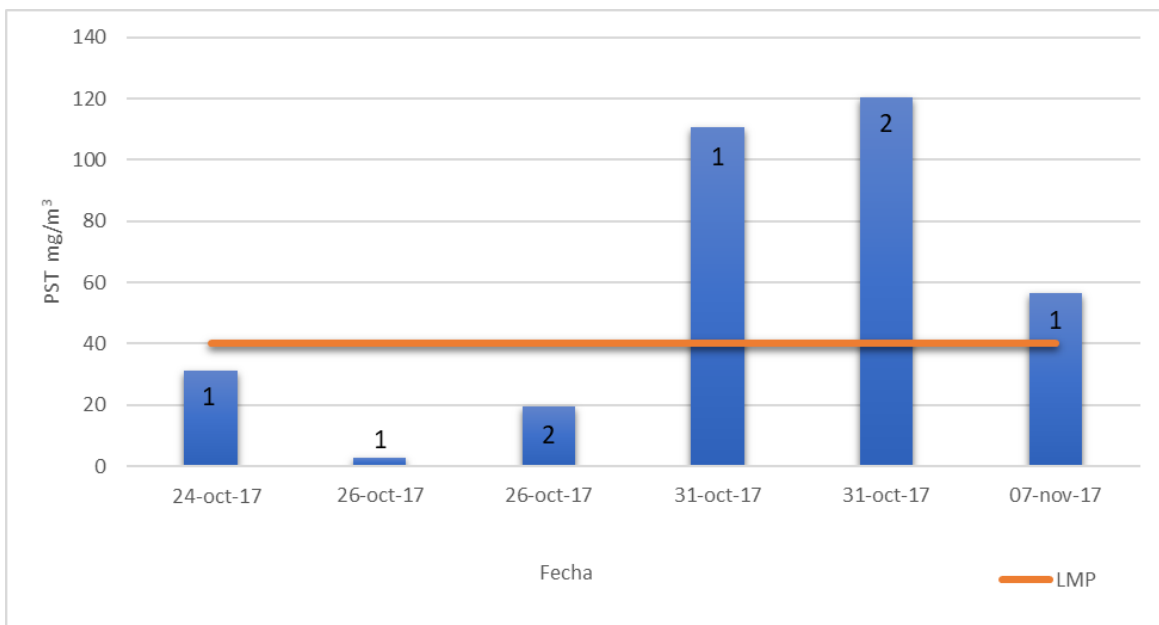


Figura 21. Concentración de PST en Horno Crematorio 2

En el horno crematorio 3 al igual que en el horno 2 se realizaron 6 muestreos de PST, donde en cada uno de ellos se rebaso el límite permitido por la norma NADF; el promedio obtenido para este horno fue de 111.9 mg m⁻³. De acuerdo a los muestreos realizados se corrobora que los hornos crematorios requieren de la instalación de un equipo de control de partículas, sin embargo, es claro que los hornos 2 y 3 son los que más partículas emiten, esto puede deberse a que entre el horno 1 y los hornos 2 y 3 existen alrededor de ocho años de diferencia en instalación lo que indica que la tecnología y el tiempo de uso entre ellos es diferente.

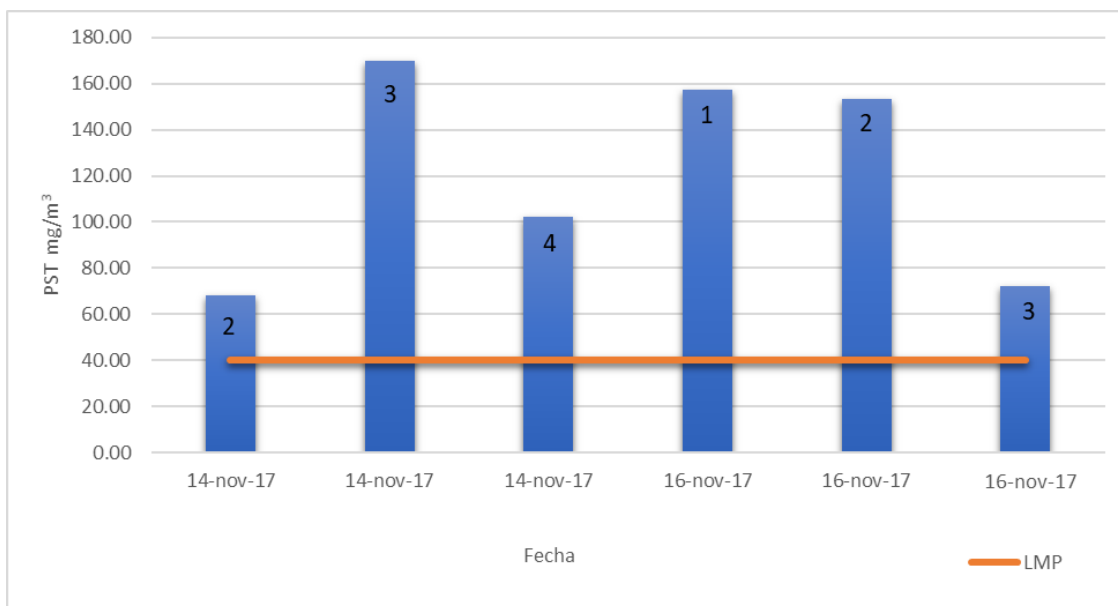


Figura 22. Concentración de PST en Horno Crematorio 3

La norma ambiental NADF únicamente tiene normadas las PST, sin embargo, los muestreos se enfocaron en PM_{2.5} por los daños que ocasionan a la salud; estas partículas tienen un tamaño de 2.5 μm lo que permite su entrada al sistema respiratorio para después pasar al torrente sanguíneo. En la Tabla 11 se muestran las diferentes concentraciones de PM_{2.5} emitidas por el horno crematorio 1. De acuerdo con la estadística básica, se obtuvo para el Horno Crematorio 1 una concentración promedio de 22.15 mg m⁻³ (Tabla 14); los resultados fueron corregidos al 11 % de O₂ en base seca.

Tabla 11. Concentración de partículas emitidas en Horno 1

HORNO CREMATORIO 1										
ITEM	Fecha	Servicio	Sexo	Edad	Peso	Temperatura Chimenea (°C)	Temperatura Horno (°C)	Flujo (m ³ /h)	Volumen muestreado (m ³)	PM _{2.5} (mg/m ³) 11% O ₂
1	24/08/2017	Segundo	F	74	82.14	353.39	710.926	1886.02	0.773	13.82
2	25/08/2017	Segundo	F	62	69.22	448.33	689.683	2455.40	0.671	22.12
3	29/08/2017	Primero	M	90	90.44	470.83	769.188	2622.61	0.692	25.31
4	29/08/2017	Segundo	F	82	46.34	424.17	687.292	3021.97	0.849	17.98
5	29/08/2017	Tercero	F	83	50.28	386.55	624.056	3060.05	0.881	19.58
6	31/08/2017	Primero	M	74	80.46	414.72	648.395	2312.76	0.856	30.90
7	01/09/2017	Primero	F	84	68.08	361.28	573.333	2793.58	0.805	25.19
8	01/09/2017	Segundo	M	80	85.94	443.78	740.111	2605.57	0.759	28.98
9	12/09/2017	Segundo	F	77	58.9	379.33	586.825	5401.75	0.782	20.84
10	12/09/2017	Tercero	F	64	25.68	326.94	514.792	4425.51	0.836	31.84
11	14/09/2017	Primero	M	71	73.26	416.50	649.815	2257.34	0.716	10.81
12	14/09/2017	Segundo	F	86	39.9	385.56	601.875	1640.27	0.686	18.46

La mayor emisión de partículas se observa en el muestreo 10 (31.84 mg m⁻³) aunque el peso del cuerpo es bajo, comparado con el peso del muestreo 11 cuya emisión de partículas fue la menor con 10.81 mg m⁻³; esta tendencia aunque no se observa en todos los casos si se da para los tres hornos crematorios, entre mayor es el peso del cadáver la emisión de partículas es menor.

Durante los muestreos los operadores de los hornos comentaron que el servicio interfería sobre las emisiones que salían de la chimenea, es decir, cuando era el primer servicio del día no se observaba humo y cuando se realizaba el tercer servicio se observaba una gran emisión de humo. Por lo que se consideró el número de cremación que se llevaba a cabo.

Sin embargo la Figura 23 muestra claramente que la concentración de partículas no aumenta o disminuye con el número de servicio que se trate; lo cual se corroboró con el coeficiente de correlación de spearman (r=0.305).

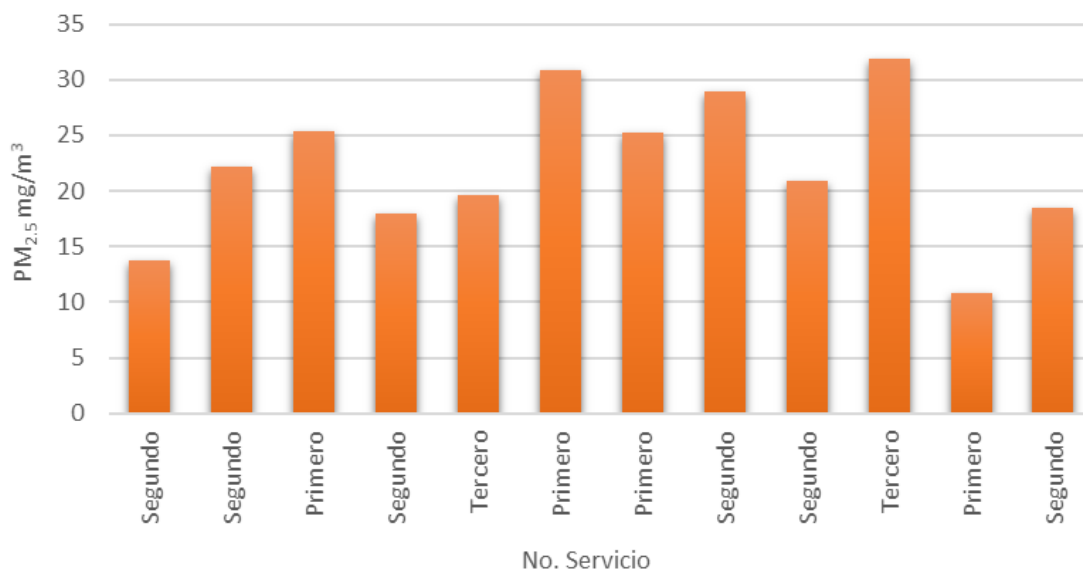


Figura 23. Emisiones de PM_{2.5} de Horno 1 con duración de 120 min.

En la Tabla 12 y 13 se presentan las concentraciones obtenidas de partículas atmosféricas PM_{2.5}, de los hornos crematorios 2 y 3 respectivamente de igual forma corregidos al 11% de O₂ en base seca. El horno crematorio 2 tuvo una concentración promedio de 101.67 mg m⁻³. No se puede realizar una comparación con el límite máximo de la norma porque el valor que da es únicamente para PST (Figura 27).

Tabla 12. Concentración de partículas emitidas en Horno 2

HORNO CREMATORIO 2										
ITEM	Fecha	Servicio	Sexo	Edad	Peso	Temperatura Chimenea (°C)	Temperatura Horno (°C)	Flujo (m ³ /h)	Volumen muestreado (m ³)	PM _{2.5} (mg/m ³) 11% O ₂
1	28/09/2017	Primero	F	52	100.52	289.67	703.29	1110.18	0.62	72.908
2	28/09/2017	Tercero	F	65	54.34	376.22	725.17	943.54	0.59	107.042
3	29/09/2017	Primero	M	68	76.6	330.44	681.88	1334.79	0.53	122.827
4	29/09/2017	Segundo	F	53	49.94	334.44	770.14	1269.45	0.28	132.411
5	29/09/2017	Tercero	M	90	93.5	405.11	703.29	1156.86	0.46	83.460
6	02/10/2017	Segundo	M	85	45.74	323.89	675.43	1201.59	0.59	177.661
7	02/10/2017	Tercero	F	68	78	442.50	727.71	1146.39	0.49	31.033
8	03/10/2017	Primero	M	46	69.68	278.22	561.25	1229.10	0.62	89.865
9	03/10/2017	Segundo	F	88	57.52	414.67	738.57	1201.09	0.58	23.133
10	03/10/2017	Tercero	M	76	55.3	339.12	649.20	1092.63	0.54	34.455
11	05/10/2017	Primero	F	75	51.64	288.22	572.29	1358.82	0.75	43.971
12	05/10/2017	Segundo	M	53	82.6	379.50	797.29	1171.31	0.62	130.377
13	05/10/2017	Tercero	M	76	62.8	348.29	721.29	992.57	0.70	59.701
14	05/10/2017	Cuarto	F	71	35.16	340.17	740.29	1050.52	0.57	185.373
15	10/10/2017	Primero	F	61	40.62	309.50	594.43	1285.41	0.65	65.564
16	10/10/2017	Segundo	F	84	30.2	318.33	632.86	1322.01	0.61	105.148
17	10/10/2017	Tercero	M	81	86	288.72	738.43	1072.53	0.42	181.019
18	12/10/2017	Primero	F	74	38.38	233.17	481.57	1447.56	0.68	109.680
19	12/10/2017	Segundo	F	66	91.4	441.61	615.86	1251.48	0.51	84.726
20	12/10/2017	Tercero	F	65	56.18	416.00	743.29	1199.99	0.53	192.959

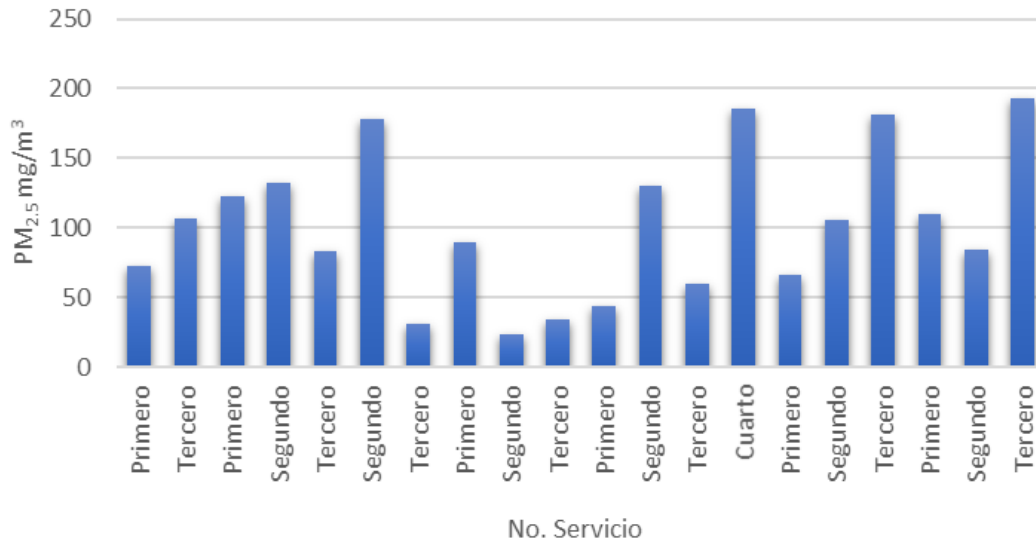


Figura 24. Emisiones de PM_{2.5} de Horno 2 con duración de 70 min.

En la Figura 25. se muestran las concentraciones de PM_{2.5} obtenidas durante la realización de los muestreos en el Horno 3. Se llevaron a cabo menor cantidad de muestreos debido a la gran similitud que presenta con el Horno 2 en cuanto a características de quemado. En este horno se obtuvo una concentración promedio de 106.78 mg m⁻³ (Tabla 14).

Tabla 13. Concentración de partículas emitidas en Horno 3

HORNO CREMATARIO 3										
ITEM	Fecha	Servicio	Sexo	Edad	Peso	Temperatura Chimenea (°C)	Temperatura Horno (°C)	Flujo (m ³ /h)	Volumen muestreado (m ³)	PM _{2.5} (mg/m ³) 11% O ₂
1	21/11/2017	Primero	M	96	67.16	263.50	370.29	1905.22	0.75	139.957
2	21/11/2017	Segundo	M	70	97.46	379.33	454.71	1874.56	0.65	78.811
3	28/11/2017	primero	M	58	64.06	303.00	423.57	2480.94	0.69	4.035
4	30/11/2017	Primero	M	78	46.38	274.44	451.29	2497.79	0.78	29.791
5	30/11/2017	Segundo	F	86	33.86	228.61	210.71	2763.67	0.87	56.845
6	30/11/2017	Tercero	M	54	150	339.72	495.86	2133.96	0.48	145.301
7	05/12/2017	Primero	M	81	74.12	239.56	209.86	3044.79	0.64	137.157
8	05/12/2017	Segundo	M	85	79.48	282.67	296.00	2328.70	0.73	49.941
9	05/12/2017	Tercero	F	99	33.32	251.39	283.83	2347.99	0.62	170.177
10	05/12/2017	Cuarto	F	69	80	241.94	250.14	2268.977	0.69	255.802

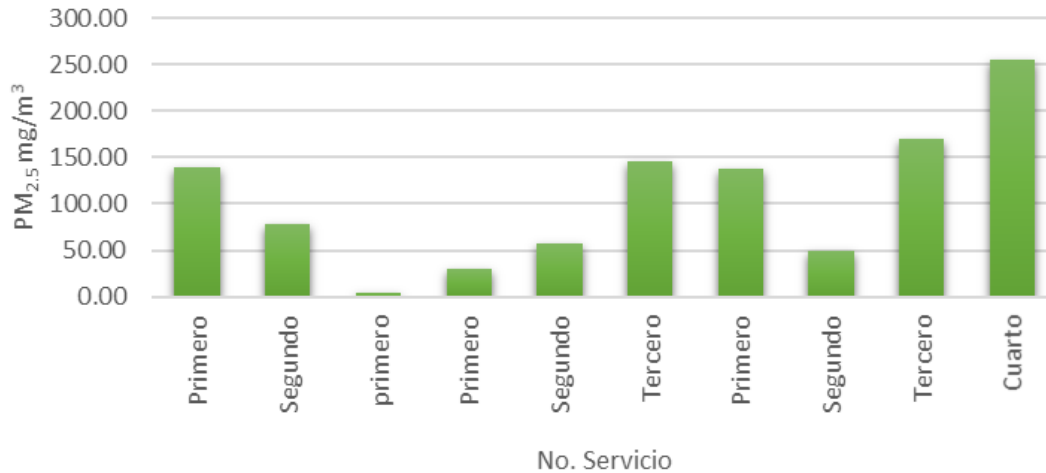


Figura 25. Emisiones de PM_{2.5} de Horno 3 con duración de 70 min.

En la columna tres de la Figura 25 (primer servicio), se observa una mínima emisión de partículas, esto puede deberse a que la persona encargada de operar el horno no siempre es la misma; y durante este servicio el horno crematorio había sido previamente precalentado, lo que no sucedió con los otros servicios.

Tabla 14. Resultados estadísticos de partículas PM_{2.5} en Horno Crematorio 1, 2 y 3

		Horno Crematorio 1	Horno Crematorio 2	Horno Crematorio 3
mg/m ³	Promedio	22.15	101.67	106.78
	Valor Máx.	31.84	192.96	255.80
	Valor Min.	10.81	23.13	4.03
	σ	6.56	53.01	76.54

La Tabla 14 muestra el promedio obtenido para las emisiones de PM_{2.5} en los tres hornos crematorios, el horno 1 aproximadamente emite el 20% de lo que emiten los hornos 2 y 3; como se mencionó en párrafos anteriores esto puede ser ocasionado por la diferencia de operación que existe entre los hornos, es decir, los hornos 2 y 3 fueron instalados con otra tecnología ocho años antes de que operara el horno 1.

3.1.1 Variables en la cremación

a. Género. En la Figura 26 se observa el diagrama de caja y bigotes para concentración de partículas y el género del cuerpo cremado considerando todos los muestreos en los tres crematorios, donde se nota que no existe diferencia entre la concentración de partículas y ambos géneros, lo que se comprobó al realizar la prueba de Mann-Whitney con una cola y un nivel de

confianza del 95 % (Tabla 15). Con los resultados arrojados se comprobó que no existe evidencia significativa que indique que las concentraciones varían dependiendo del género.

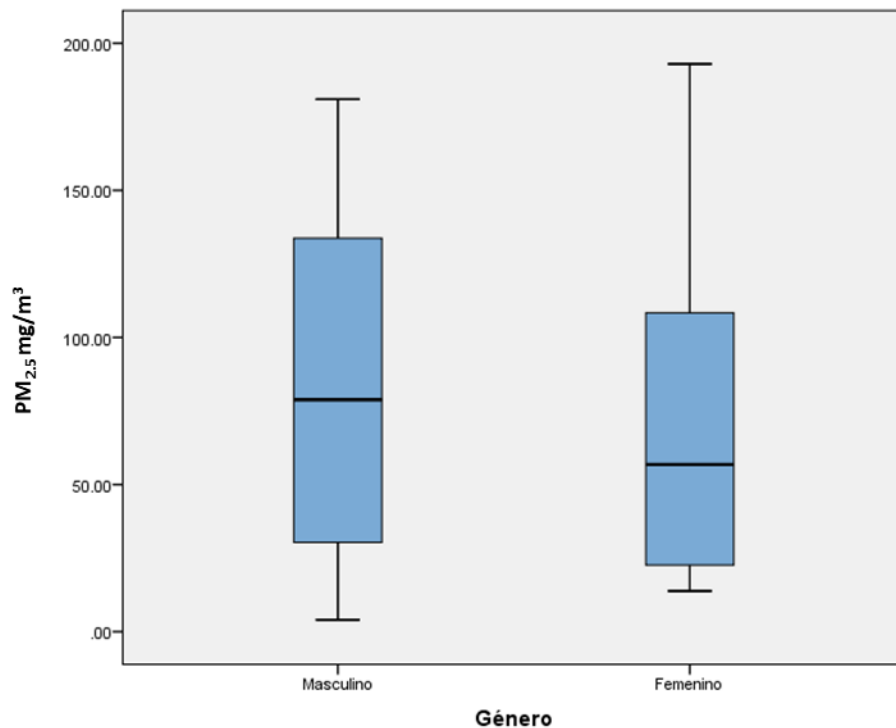


Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes para PM_{2.5} y el género del cuerpo cremado

Tabla 15. Prueba de Mann Whitney para concentración de partículas y género del cuerpo cremado

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] con servicios femeninos y masculinos	Ho:[PM _{2.5}]mujer = [PM _{2.5}]hombre Ha:[PM _{2.5}]mujer \neq [PM _{2.5}]hombre	0.95	0.570	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

b. Número de servicio. Para determinar si el número de servicio realizado en cada cremación influía en las emisiones, se realizó la prueba de Mann-Whitney con un intervalo de confianza del 95% y una cola (Anexo 2) con cada uno de ellos. Con los resultados arrojados se comprobó que no existe evidencia estadística suficiente que indique que las concentraciones de partículas varían dependiendo si es el primer servicio o el último.

Sin embargo, para comprobar si existía una dependencia entre estas variables (número de servicio y concentración de partículas) se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (Anexo 3), donde se puede concluir que no existe una correlación ($r=0.305$), es decir, la emisión de partículas no depende del servicio que se lleve a cabo, lo que puede ser observado en la Figura 27,

en el diagrama de cajas y bigotes donde se observa que no existe aumento al tratarse del primero o segundo servicio.

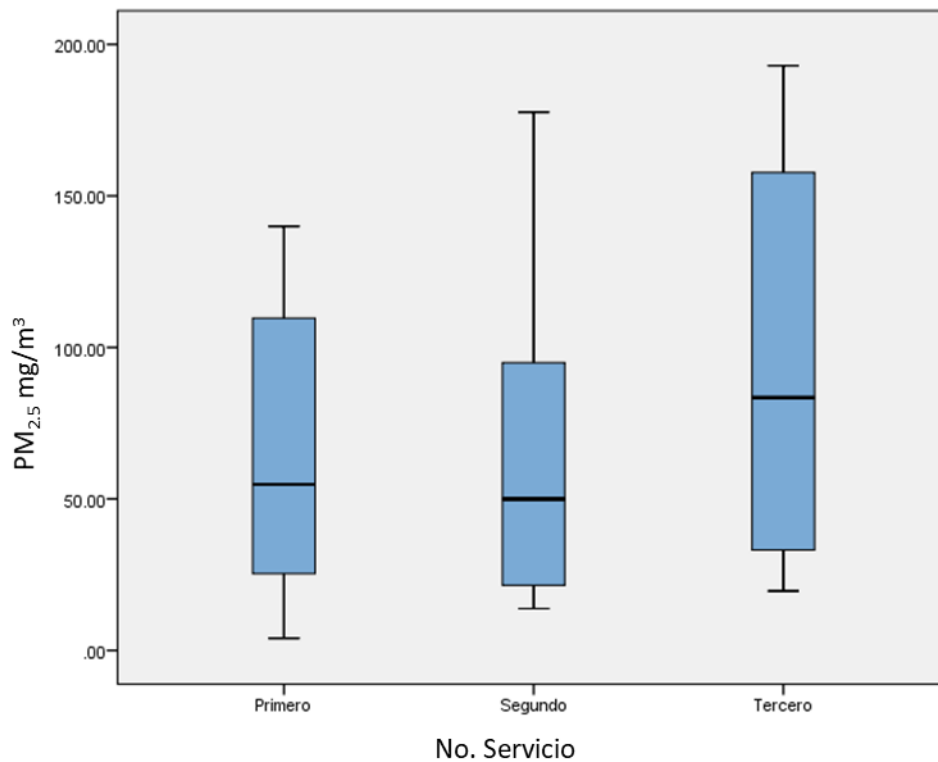


Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes para $PM_{2.5}$ y número de servicio

c. Enfermedad declarada. Se procuró encontrar si las enfermedades crónicas o no crónicas de los individuos cremados influían en las emisiones de partículas, encontrándose que solamente dos enfermedades eran las más comunes: diabetes, hipertensión arterial y una combinación de ambas, diabetes junto con hipertensión, representando el 21 %, 16 % y 14 % respectivamente de los muestreos (Figura 28). Otras enfermedades reportadas en las actas de defunción fueron: cáncer de tiroides, insuficiencia pancreática, cirrosis, neumonía, choque séptico, insuficiencia renal, entre otras.

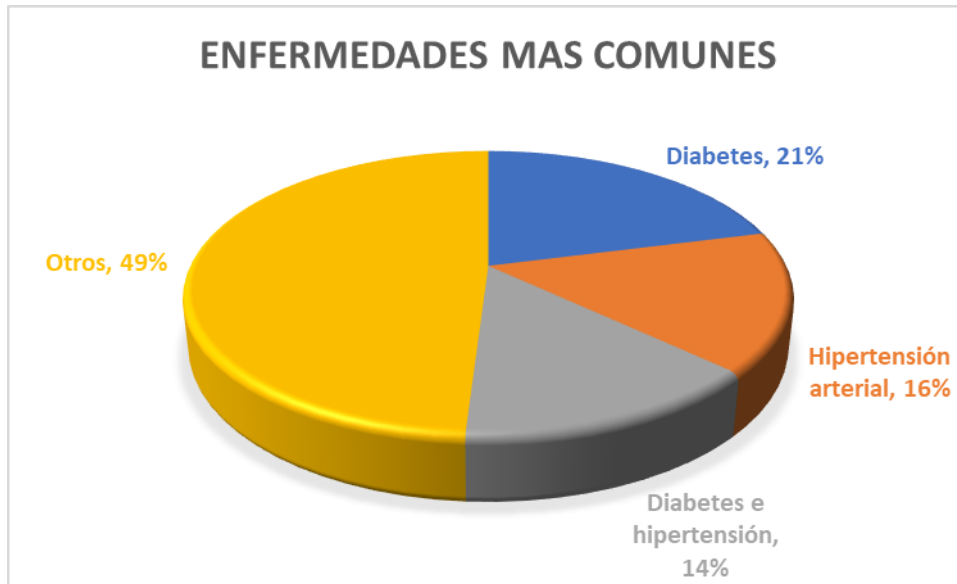


Figura 28. Enfermedades más comunes en los muestreos

Sin embargo, aunque fueron las enfermedades predominantes el coeficiente de correlación de Spearman con un nivel de significancia del 95% (Tabla 16), indica que no existe evidencia estadística suficiente que compruebe que la concentración de partículas emitidas por los hornos se relaciona con dichas enfermedades.

Tabla 16. Coeficiente de correlación de Spearman para concentración de partículas y enfermedades

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] con categoría de enfermedades	Ho: No existe correlación entre las enfermedades y la concentración de partículas Ha: Existe correlación entre las enfermedades y la concentración de partículas	0.95	0.765	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

d. Peso. En la realización de los muestreos también se consideró el peso de los cadáveres, se utilizó la prueba de Mann-Whitney con un 95% de significancia para conocer si existía variabilidad entre los diferentes pesos (Tabla 17), con lo que se concluye que no existen diferencias significativas entre los pesos y las emisiones de partículas.

Tabla 17. Prueba de Mann Whitney para concentración de partículas y peso

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] relacionada el peso	Ho: No existe diferencia entre el peso y la concentración de partículas Ha: Existe diferencia entre el peso y la concentración de partículas	0.95	0.567	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Para confirmar que no existía relación entre el peso de los cadáveres y las emisiones de partículas se obtuvo el coeficiente de correlación de Spearman (Anexo 4), donde se corroboró que no existía relación entre estas dos variables.

e. Edad. La prueba de Mann-Whitney con una cola y un nivel de significancia del 95% (Anexo 5) demostró que no existe evidencia estadística suficiente que indique una diferencia entre la concentración de partículas y la edad de los cadáveres.

f. Eficiencia de combustión. En la Tabla 18 se presenta la estadística básica para la eficiencia de combustión obtenida en los tres hornos crematorios; el valor de MCE en el horno crematorio 1 (MCE>0.99) indica que la combustión es más eficiente en este horno. Como se indica en la sección 2.1 la capacidad de la primer cámara es menor en el horno 1, por lo que al realizar la prueba de Mann-Whitney entre los hornos 1 y 2 se comprueba que existe una diferencia significativa entre ellos ($p<0.05$); esta diferencia también se comprueba entre los hornos 2 y 3 ($p<0.05$). Estas diferencias pueden apreciarse en el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 29.

Tabla 18. Estadística básica para MCE de los hornos crematorios

		Horno Crematorio 1	Horno Crematorio 2	Horno Crematorio 3
MCE	Promedio	0.9981	0.9879	0.9964
	Valor Máx.	0.9997	0.9996	0.9995
	Valor Min.	0.9954	0.9451	0.9838
	σ	0.0013	0.0145	0.0044

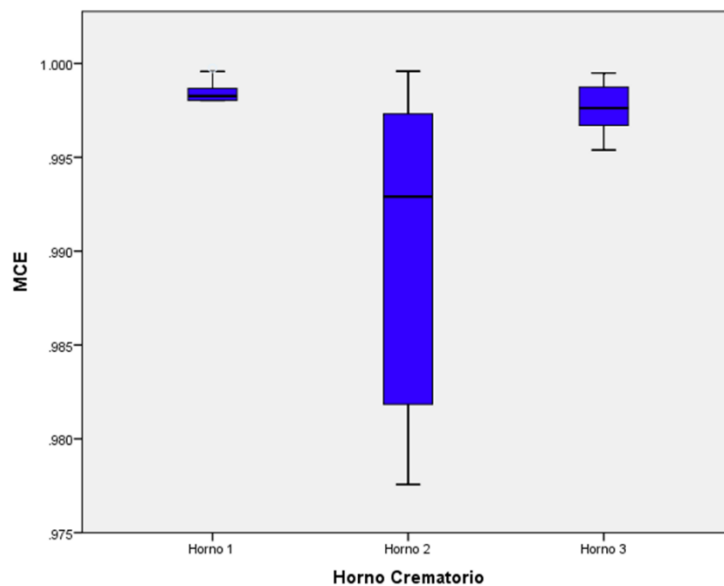


Figura 29. Diagrama de cajas y bigotes de la eficiencia en los 3 hornos crematorios

Por otro lado, entre los hornos 1 y 3 no existe evidencia estadística significativa que indique una diferencia entre las eficiencias de los hornos. Con base al estadístico de correlación de Spearman se conoce que la MCE presenta una correlación inversa ($r = -0.958$) con la emisión de CO, es decir, a menor eficiencia de combustión mayor es la emisión de CO. Aunque la concentración de partículas no presentó correlación con la MCE ($r=0.242$) en la Figura 30 se observa que conforme disminuye la eficiencia de combustión aumenta la concentración de partículas emitidas

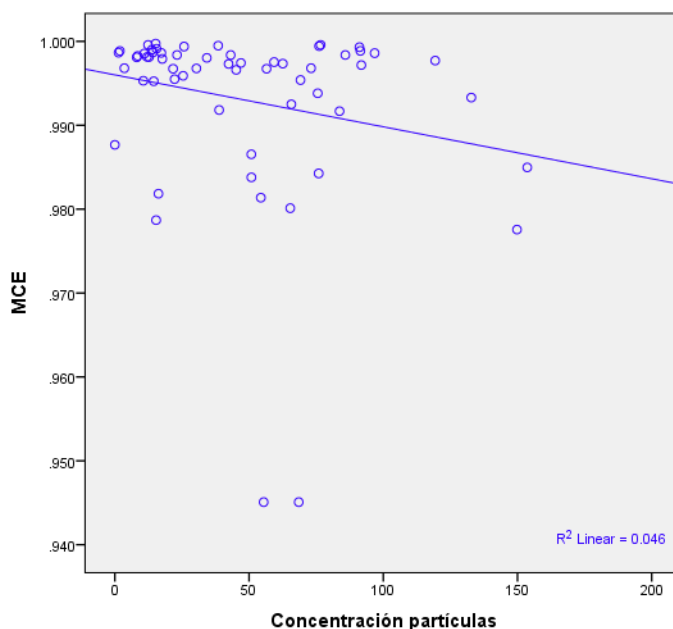


Figura 30. Relación de la MCE con la concentración de partículas (mg/m^3)

3.2 Concentración de CO

El CO es un producto que se forma en la combustión incompleta cuando el carbono que se encuentra presente en el combustible se oxida de manera parcial.

La cuantificación de estas emisiones de los hornos crematorios 1, 2 y 3 con respecto al servicio realizado se pueden observar en la Figura 31, 32 y 33 respectivamente.

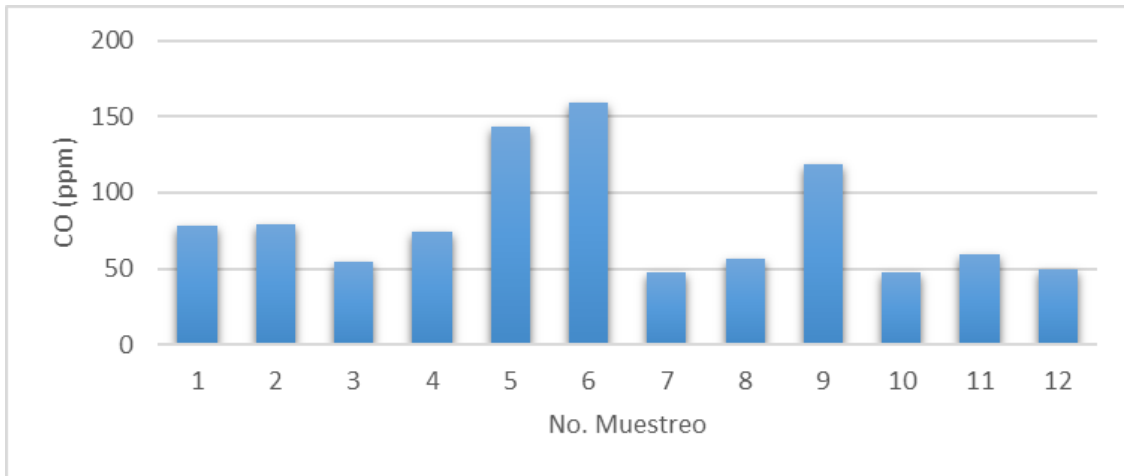


Figura 31. Concentración (ppm) de CO en Horno Crematorio 1

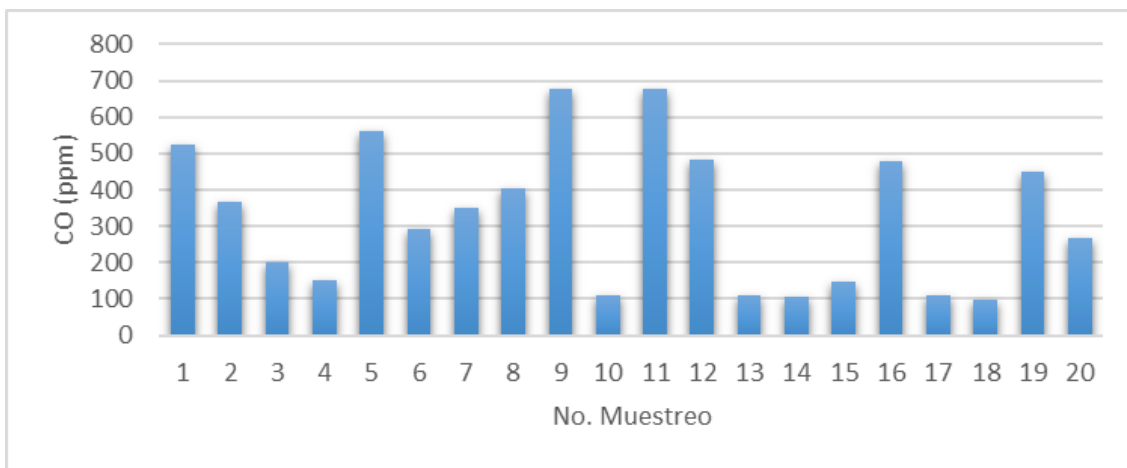


Figura 32. Concentración (ppm) de CO en Horno Crematorio 2

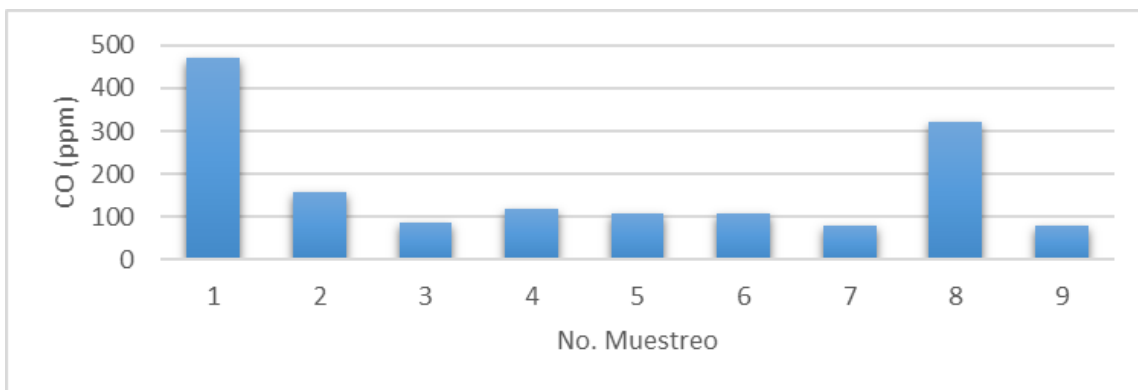


Figura 33. Concentración (ppm) de CO en Horno Crematorio 3

Como se mencionó anteriormente el CO es un producto intermedio generado en el proceso de combustión; la reacción principal en la que interviene es en la oxidación de CO a CO₂ (Schorr, 1991). Esta reacción es de gran importancia debido a que forman un camino para la combustión de hidrocarburos.

La formación de CO tiene lugar cuando el oxígeno disponible es inferior a la cantidad necesaria para realizar una combustión completa, es decir, existe disminución de CO cuando existe un aumento significativo de aire (O₂).

La Figura 34 muestra el diagrama de caja y bigotes de las emisiones de CO y los tres hornos crematorios, se puede observar que existe diferencia con el horno 2 y los hornos 1 y 3; esto se debe al manejo del operador, ya que como se ha venido mencionando si influye la forma en la que cada persona opera el horno crematorio; lo que indica la emisión de CO en el horno 2 es que esos servicios se llevaron a cabo con una cantidad de aire (O₂) mínima.

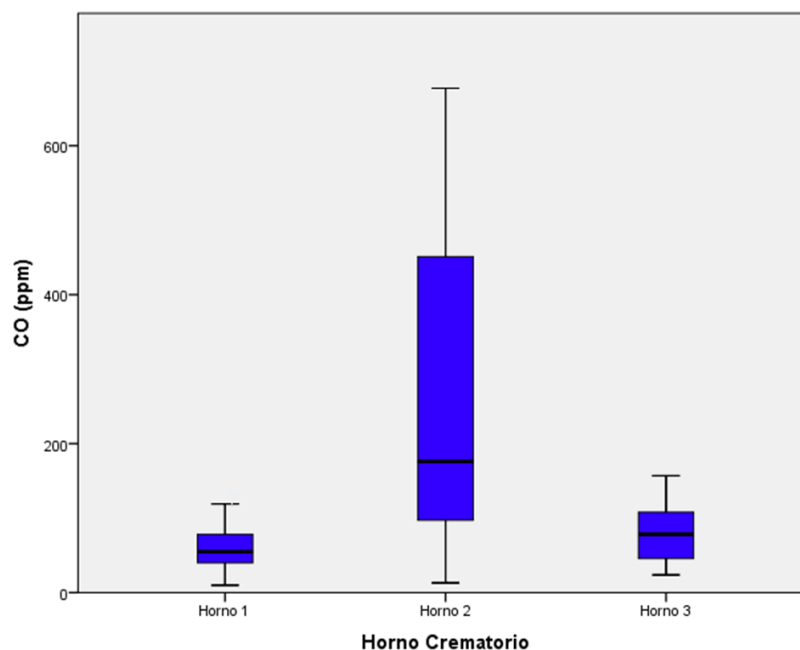


Figura 34. Diagrama de cajas y bigotes de emisiones de CO en los tres hornos crematorios

La disminución del CO en la Figura 35 se observa que está en función del aumento de temperatura, entre más alta es la temperatura dentro del horno crematorio menor es la producción de monóxido de carbono. Cabe mencionar que estas emisiones de CO son correspondientes a los tres hornos crematorios.

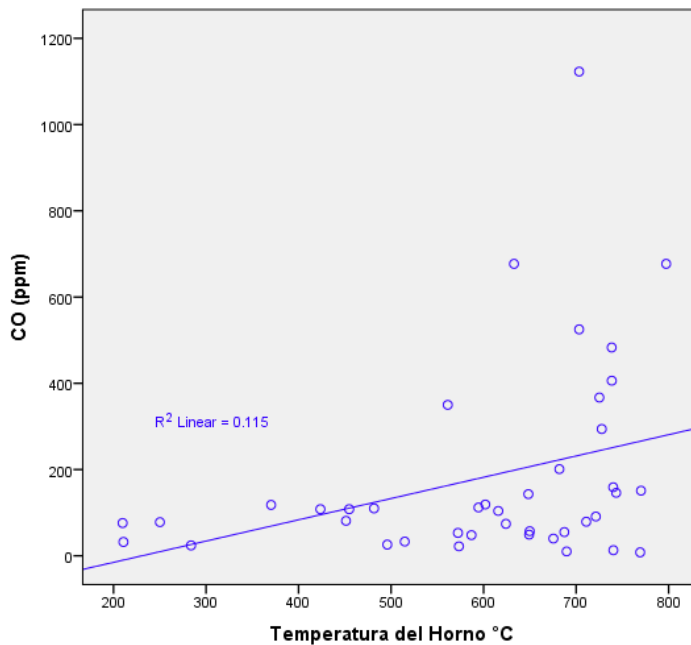


Figura 35. Relación entre temperatura y emisión de CO en los tres hornos crematorios

Aunque no fue posible determinar el oxígeno inyectado dentro del proceso de combustión se pudo observar mediante los gases monitoreados en la salida de la chimenea que cuando ingresaba un cuerpo de menor peso, la lectura de oxígeno era mayor, y viceversa, es decir, cuando ingresaba un cuerpo más pesado la lectura de oxígeno a la salida de la chimenea disminuía. Para confirmar la relación existente entre estas dos variables (peso y oxígeno) se realizó el coeficiente de correlación de Spearman con un 95% de significancia (Anexo 6) donde indica que existe evidencia suficiente para decir que existe una relación inversa entre ellas, a menor peso mayor salida de oxígeno (Figura 36). Esto es debido a que entre mayor es el cuerpo a cremar la cantidad de oxígeno requerida también aumenta para que el proceso de combustión se pueda llevar a cabo.

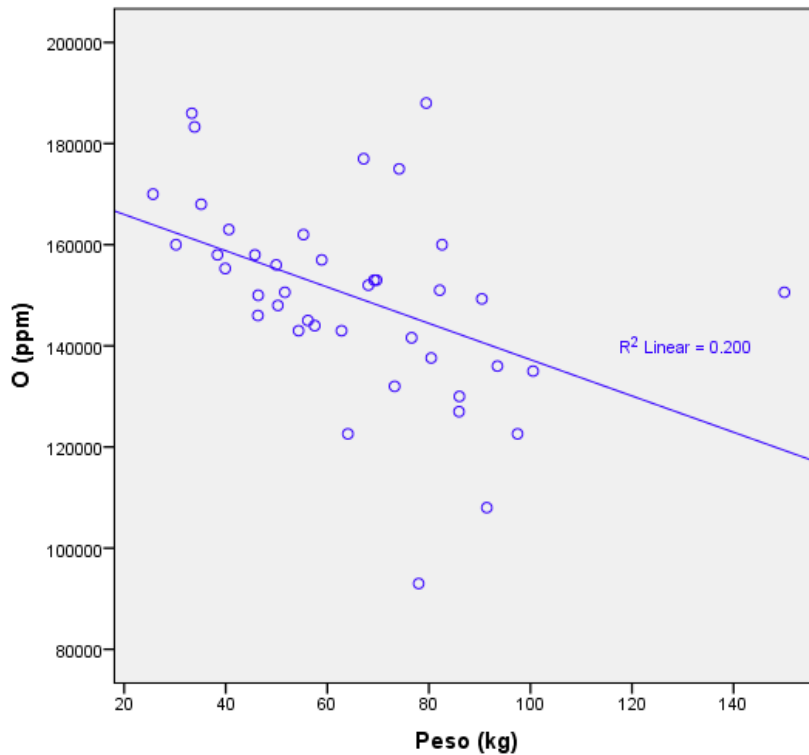


Figura 36. Correlación entre peso del cuerpo cremado y la emisión de oxígeno

3.3 Concentración de carbono elemental y carbono orgánico

Las Figuras 36, 37 y 38 muestran las concentraciones de carbono elemental y carbono orgánico presentes en PM_{2.5} emitidas por el Horno Crematorio 1, 2 y 3 respectivamente, las cuales se obtuvieron empleando el analizador Sunset Laboratory.

En el horno crematorio 1 se muestra que en general las concentraciones de EC y OC son menores a 0.08 mg m⁻³, con excepción de un dato extremo de EC en la quinta cremación.

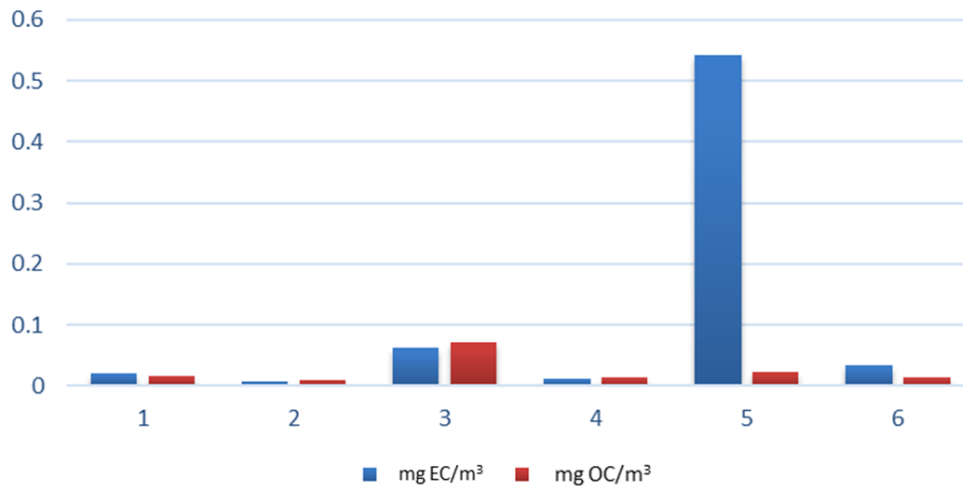


Figura 37. Concentración de OC y EC en Horno Crematorio 1

En el horno crematorio 2 las concentraciones de EC y OC tuvieron mayor variación. La mayoría de los valores fueron menores a 0.4 mg m^{-3} , sin embargo, alrededor del 45 % de los muestreos presentó concentraciones de EC hasta 16 veces más altas que las de OC.

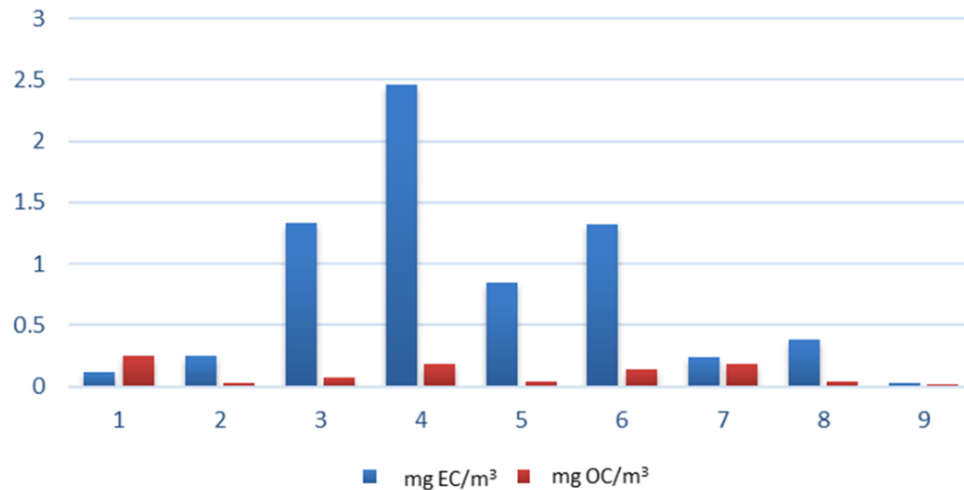


Figura 38. Concentración de OC y EC en Horno Crematorio 2

En el sexto muestreo del horno crematorio 3 claramente se observa un aumento significativo en cuanto a la concentración de carbono orgánico y elemental, esto puede deberse a que el peso del cuerpo se estimó alrededor de los 150 kg, y el muestreo tuvo que ser detenido a los 15 minutos debido a que había un exceso de emisiones lo que ocasiono una saturación de filtro.

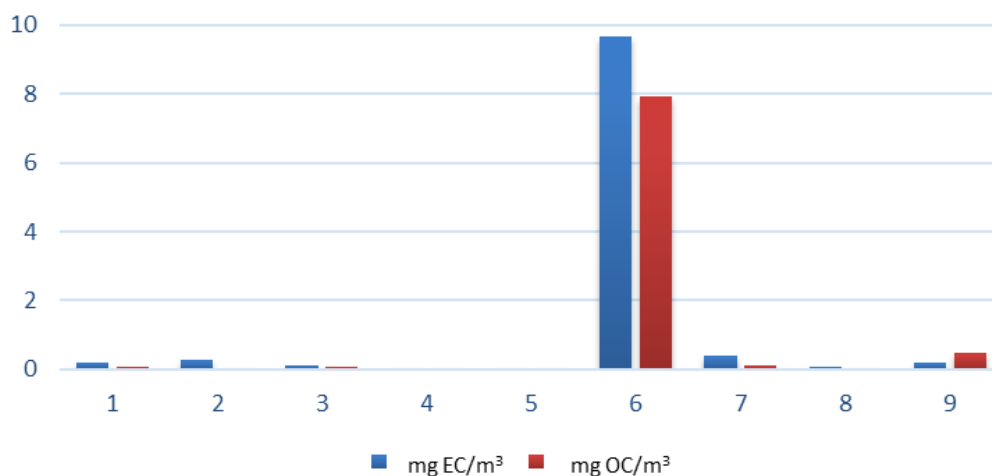


Figura 39. Concentración de OC y EC en Horno Crematorio 3

La Figura 40 presenta las concentraciones de OC y EC del horno 3, sin considerar el muestreo 6 de la Figura 39, esto con la finalidad de que los valores puedan apreciarse mejor.

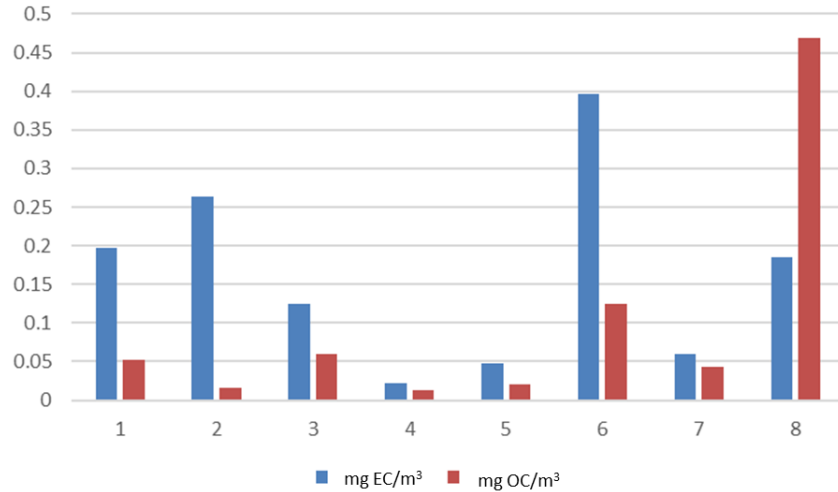


Figura 40. Concentración de OC y EC En Horno Crematorio 3

De acuerdo con la estadística básica realizada (Tabla 19) el Horno Crematorio 1, presenta una concentración promedio de 0.027 mg m^{-3} de carbono elemental y 0.025 mg m^{-3} de carbono orgánico. Por otro lado, el Horno Crematorio 2 presenta un promedio de 0.206 mg m^{-3} y 0.104 mg m^{-3} para carbono elemental y carbono orgánico, respectivamente; finalmente el Horno Crematorio 3 tiene un promedio de 0.162 mg m^{-3} de carbono elemental y 0.100 mg m^{-3} de carbono orgánico. Este análisis se realizó descartando aquellos valores que se encontraban fuera de la tendencia observada.

Tabla 19. Resultados estadísticos de carbono en Hornos Crematorios

		Horno Crematorio 1			Horno Crematorio 2			Horno Crematorio 3		
		EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT
mg/m ³	Promedio	0.027	0.025	0.052	0.206	0.104	0.310	0.162	0.100	0.262
	Valor Máx.	0.063	0.073	0.135	0.387	0.254	0.426	0.396	0.469	0.654
	Valor Min.	0.008	0.010	0.017	0.027	0.022	0.049	0.022	0.013	0.035
	σ	0.022	0.026	0.048	0.139	0.106	0.157	0.126	0.153	0.221

Para realizar el análisis estadístico más detallado y conocer si existe correlación entre variables, se consideró únicamente los datos obtenidos en los hornos crematorios 2 y 3 (descartando el horno 1 por tener menor número de muestras). Durante el análisis de carbono total se observó que existía un aumento considerable en el carbono elemental cuando el filtro correspondía a un cuerpo de mayor peso.

Se empleó el coeficiente de correlación de Spearman con una significancia del 95% (Anexo 7) para conocer si existía una dependencia entre EC y OC con el peso del cuerpo cremado. El análisis arrojó una correlación positiva entre el peso del cuerpo cremado y carbono elemental, es decir, si el peso del cuerpo es mayor el carbono elemental también presenta un aumento.

El carbono orgánico también presentó una correlación positiva con el peso del cuerpo cremado (Anexo 8).

Como se observó en las figuras anteriores (38, 39 y 40) cada horno presenta valores que están fuera de la tendencia observada, por lo que el análisis estadístico únicamente se realizó considerando estos valores.

Para determinar si alguna variable de la cremación influía en estas emisiones, se realizó el coeficiente de correlación de Spearman con un intervalo de confianza del 95% y una cola con cada uno de ellas. Con los resultados arrojados se comprobó que existe evidencia estadística suficiente que indique que las concentraciones de carbono total tienen una relación con el género del cuerpo ($r=0.828$) debido a que los cuerpos de género masculino fueron los que mayores emisiones tuvieron.

3.4 Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos en PST

Para la cuantificación de HAP's se emplearon los filtros muestreados de partículas suspendidas totales, estos filtros fueron sometidos al proceso de extracción como lo indica la sección 2.5.1. En las Tablas 20, 21 y 22 se presenta la estadística básica de las concentraciones de HAP's obtenidas del Horno Crematorio 1, 2 y 3 respectivamente.

La suma promedio total de los HAP's presentes en las muestras del horno crematorio 1 fue de $16.40 \mu\text{g m}^{-3} \pm 1.53$ ($n=4$). La suma de HAP's cancerígenos fue de $7.92 \mu\text{g m}^{-3} \pm 1.18$, es decir, el 48% de HAP's emitidos en el horno crematorio 1 son cancerígenos, entre los cuales el benzo[*a*]pireno representa el 15%.

El naftaleno, 2-metilnaftaleno y antraceno fueron poco abundantes (representan el 0.39, 0.16 y 0.37% respectivamente), mientras que las concentraciones del acenaftileno, acenafteno, fluoreno y dibenzo[*a,h*]antraceno no fue posible leerlas con el equipo, esto debido a que al ser HAP's con 2 y 3 anillos aromáticos se encuentran principalmente en la fase gaseosa (Vione *et al.*, 2004) y su adsorción a las partículas fue baja.

Tabla 20. Concentración total de HAP's ($\mu\text{g m}^{-3}$). La media y la mediana mostrada es de todas las concentraciones de los muestreos realizados, (n=4).

HAP	HORNO CREMATARIO 1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	MEDIANA	P10	P90
Naftaleno	0.07	0.05	0.06	0.02	0.11
2-Metilnaftaleno	0.03	0.02	0.02	0.01	0.05
Acenaftileno	ND	ND	ND	ND	ND
Acenafteno	ND	ND	ND	ND	ND
Fluoreno	ND	ND	ND	ND	ND
Fenantreno	0.21	0.31	0.07	0.05	0.50
Antraceno	0.03	0.05	0.01	0.00	0.08
Fluoranteno	0.74	1.15	0.24	0.09	1.80
Pireno	1.17	1.85	0.34	0.13	2.87
Benzo[a]antraceno	0.77	1.44	0.07	0.02	2.08
Criseno	1.25	2.43	0.06	0.00	3.46
B[b]F + B[k]F	3.12	6.12	0.08	0.02	8.64
Benzo[a]pireno	1.16	2.26	0.05	0.00	3.21
Indeno[1,2,3-cd]pireno	2.88	5.71	0.03	0.01	8.02
Dibenzo[a,h]antraceno	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo[ghi]perileno	4.97	9.88	0.05	0.01	13.88

El horno crematorio 2 presenta un promedio de $372.98 \mu\text{g m}^{-3} \pm 33.23$ (n=6). Los HAP's cancerígenos representan el 37% de las emisiones contribuyendo el benzo[a]pireno contribuye con un 33%.

Tabla 21. Concentración total de HAP's ($\mu\text{g m}^{-3}$). La media mostrada es de todas las concentraciones de los muestreos realizados

HAP	HORNO CREMATORIO 2 ($\mu\text{g/m}^3$)				
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	MEDIANA	P10	P90
Naftaleno	0.11	0.10	0.05	0.03	0.23
2-Metilnaftaleno	0.03	0.02	0.02	0.01	0.05
Acenaftileno	0.20	0.39	0.03	0.00	0.58
Acenafteno	ND	ND	ND	ND	ND
Fluoreno	0.07	0.12	0.01	0.00	0.19
Fenantreno	4.58	9.81	0.42	0.07	13.26
Antraceno	ND	ND	ND	ND	ND
Fluoranteno	60.26	137.64	3.48	0.45	176.86
Pireno	110.45	251.36	6.46	0.62	324.26
Benzo[a]antraceno	18.16	36.13	2.61	0.14	51.71
Criseno	1.39	1.67	0.78	0.37	3.01
B[b]F + B[k]F	41.83	73.99	9.93	1.27	114.29
Benzo[a]pireno	44.93	86.59	8.10	0.34	126.36
Indeno[1,2,3-cd]pireno	32.92	60.29	7.02	0.56	91.18
Dibenzo[a,h]antraceno	0.96	1.33	0.32	0.03	2.54
Benzo[ghi]perileno	57.09	106.84	12.60	0.83	157.83

La suma promedio total de los HAP's presentes en las muestras procedentes del horno crematorio 3 fue de $95 \mu\text{g m}^{-3} \pm 11$ (n=6). La suma de HAP's cancerígenos es de $47.18 \mu\text{g m}^{-3} \pm 6.54$, representan el 49.67% de los HAP's emitidos.; el benzo[a]pireno contribuye con un31%.

Tabla 22. Concentración total de HAP's ($\mu\text{g m}^{-3}$). La media mostrada es de todas las concentraciones de los muestreos realizados.

HAP	HORNO CREMATORIO 3 ($\mu\text{g/m}^3$)				
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	MEDIANA	P10	P90
Naftaleno	0.08	0.08	0.08	0.03	0.16
2-Metilnaftaleno	0.03	0.02	0.02	0.01	0.05
Acenaftileno	0.07	0.15	0.15	0.00	0.20
Acenafteno	ND	ND	ND	ND	ND
Fluoreno	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04
Fenantreno	0.41	0.52	0.52	0.09	1.01
Antraceno	0.40	0.53	0.53	0.06	1.01
Fluoranteno	2.05	2.63	2.63	0.17	5.43
Pireno	3.62	4.90	4.90	0.16	9.70
Benzo[a]antraceno	2.18	4.66	4.66	0.07	6.30
Criseno	0.80	0.91	0.91	0.07	1.92
B[b]F + B[k]F	13.48	28.37	28.37	0.15	38.58
Benzo[a]pireno	14.82	31.45	31.45	0.19	42.55
Indeno[1,2,3-cd]pireno	16.70	34.18	34.18	0.16	47.09
Dibenzo[a,h]antraceno	0.36	0.66	0.66	0.00	0.98
Benzo[ghi]perileno	39.95	82.19	82.19	0.33	112.75

Los diferentes tipos de HAP'S que se producen dependen principalmente de la temperatura, la relación entre combustible y aire; generalmente se forman hidrocarburos de 4 o más anillos (Benner *et al.*, 1990). Los HAP'S como fluoranteno, pireno, criseno, benzo[*b*]fluoranteno, benzo[*k*]fluoranteno, benzo[*a*]pireno, benzo[*ghi*]perileno e indeno[1,2,3-*cd*]pireno, es decir, los HAP'S de alto peso molecular fue posible cuantificarlos debido a que tienen una mayor afinidad por las partículas, esta característica es consecuencia de su baja presión de vapor (Lu *et al.*, 2008).

Los tres hornos crematorios emitieron $195.95 \mu\text{g m}^{-3} \pm 15.91$ (n=16) de HAP's cancerígenos, representando el 39.83% de los HAP's emitidos. En los tres hornos crematorios no fue posible cuantificar el acenafteno, mientras que el fluoreno y 2-metilnaftaleno fueron poco abundantes. En benzo[*a*]pireno se encontró en los tres hornos crematorios siendo de especial interés por la capacidad que tiene para desarrollar efectos carcinogénicos, mutagénicos y/o genotóxicos (Mastandrea *et al.*, 2005). En los hornos 1 y 3 el HAP más abundante fue el benzo[*ghi*]perileno, representando el 30.33 y 42.06%, respectivamente.

La Figura 41 presenta el diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de HAP's obtenidas en cada uno de los hornos, y aunque se observa una gran variabilidad entre el horno 2 y los hornos 1 y 3; la prueba Mann-Whitney con un 95% de significancia (Anexo 8) indica que únicamente existe diferencia significativa entre las emisiones del horno 1 y el horno 2.

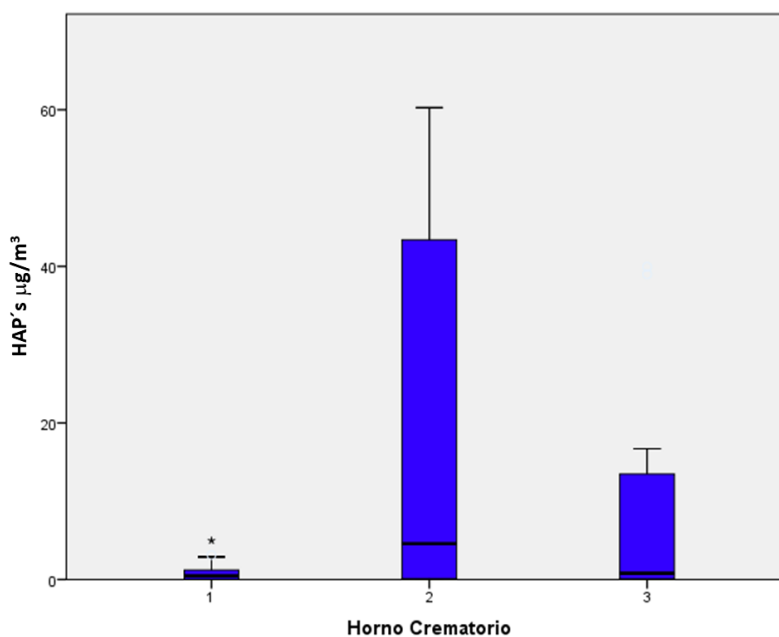


Figura 41. Diagrama de cajas y bigotes de la concentración promedio de HAP's emitidas en los tres hornos crematorios

Para conocer si existía alguna variable (peso, edad género, temperatura, número de servicio) de la cual dependiera la emisión de HAP's. Se llevó a cabo la correlación de coeficiente de Spearman con una cola y un nivel de significancia del 95%; la Tabla 23 muestra las correlaciones de Spearman para los HAP's que tienen 2 y 3 anillos aromáticos (naftaleno, 2-metilnaftaleno, acenaftileno y fluoreno) y las variables con las que presentaron correlación; estas correlaciones ya involucran las emisiones de los tres hornos crematorios

No se consideró el acenafteno debido a que no fue posible cuantificarlo en ninguno de los tres hornos; por otro lado, se consideró el acenaftileno porque, aunque no se logró cuantificar en el horno 1, en el horno 2 y 3 si fue posible.

La Tabla 23 muestra una correlación positiva de acenaftileno, fluoreno, fenantreno y antraceno con el peso del cadáver, es decir, si aumenta el peso también aumenta la emisión de estos HAPs. El acenaftileno, fluoreno y antraceno mostraron también una correlación negativa con el género lo que indica que hay una disminución en la emisión de HAP's si el género del cuerpo cremado es masculino.

Finalmente se observó que, con la edad, temperatura del horno y número de servicio no existe ninguna correlación, es decir, las emisiones de estos HAP's no se ven afectadas por estas variables.

Tabla 23. Correlación de Spearman para HAP's de 2 y 3 anillos aromáticos (n=16), p>0.05

	Género	Edad	Peso	Temperatura	Número de Servicio
Naftaleno	-	-	-	-	-
2-Metilnaftaleno	-	-	-	-	-
Acenaftileno	0.533	-	0.658	-	-
Fluoreno	0.57	-	0.599	-	-
Fenantreno	-	-	0.741	-	-
Antraceno	0.763	-	0.731	-	-

Las correlaciones de los HAP's con 4, 5 y 6 anillos aromáticos en su estructura (fluoranteno, pireno, benzo[a]antraceno, criseno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[a]pireno, indeno[1,2,3-cd]pireno, dibenzo[a,h]antraceno y benzo[ghi]perileno) se muestran en la Tabla 25.

Tabla 24. Correlación de Spearman para HAP's de 4, 5 y 6 anillos aromáticos (n=16), $p>0.05$

	Género	Edad	Peso	Temperatura	Número de Servicio
Fluoranteno	-	-	0.644	-	-
Pireno	-	-	0.647	-	-
Benzo[a]antraceno	-	-	0.618	-	-
Criseno	-	-	0.606	-	-
B[b]F+B[k]F	-	-	0.612	-	-
Benzo[a]pireno	-	-	0.687	-	-
Indeno[1,2,3-cd]pireno	-	-	0.768	-	-
Dibenzo[a,h]antraceno	-	-	0.751	-	-
Benzo[ghi]perileno	-	-	0.768	-	-

Como se observa en la Tabla 24 los HAP's de 4, 5 y 6 anillos aromáticos están relacionados con el peso del cuerpo cremado, fueron correlaciones positivas, es decir, entre mayor sea el peso mayor serán las emisiones de HAP's.

De acuerdo con las dos tablas anteriormente mostradas se puede concluir que la emisión de HAP's está relacionada de forma positiva principalmente con el peso del cuerpo cremado. Sin embargo, acenaftileno, fluoreno y antraceno también se ven afectados por el género del cuerpo, habiendo más emisiones cuando el cuerpo es de género femenino. La Figura 42 muestra la concentración promedio de los HAP's de los tres hornos crematorios, así como su desviación estándar. Se puede observar que el HAP con mayor emisión fue el pireno, los HAP's con 4, 5 y 6 anillos son los que se emiten en mayor concentración.

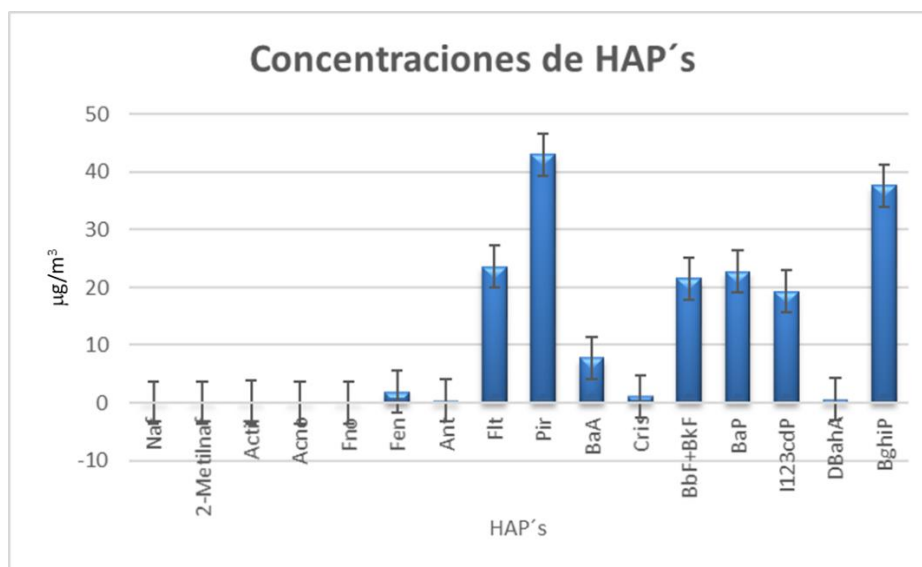


Figura 42. Concentración promedio de los HAP's provenientes de los 3 hornos crematorios

3.5 Concentración de metales

Para cuantificar los metales emitidos en los hornos crematorios se emplearon los filtros muestreados de partículas suspendidas totales. En las Tablas 25, 26 y 27 se presenta la estadística básica de las concentraciones de metales obtenidas en los hornos 1, 2 y 3 respectivamente. Los metales más abundantes fueron el arsénico y el mercurio. El primero puede ser ingresado al ser humano mediante la ingestión debido a que es bioacumulable, mientras que el mercurio se utiliza en tratamientos dentales (amalgamas).

Tabla 25. Estadística básica para metales emitidos en el Horno Crematorio 1 (n=4)

	$\mu\text{g}/\text{m}^3$							
	As	Hg	Cd	Pb	V	Cu	Fe	Al
Promedio	4.395	4.664	2.749	1.199	3.131	1.387	0.491	0.614
Valor Máx.	5.588	5.753	4.264	1.494	3.936	2.455	0.699	0.767
Valor Min.	3.264	3.277	1.290	0.921	2.499	0.441	0.326	0.431
σ	1.077	1.026	1.215	0.254	0.616	0.837	0.156	0.139

Tabla 26. Estadística básica para metales emitidos en el Horno Crematorio 2 (n=6)

	$\mu\text{g}/\text{m}^3$							
	As	Hg	Cd	Pb	V	Cu	Fe	Al
Promedio	2.209	3.042	1.495	0.759	2.994	0.920	0.601	0.643
Valor Máx.	3.308	3.511	2.828	0.960	3.576	1.528	0.873	0.872
Valor Min.	1.462	2.440	0.952	0.564	2.577	0.380	0.383	0.286
σ	0.789	0.363	0.688	0.133	0.380	0.372	0.210	0.217

Tabla 27. Estadística básica para metales emitidos en el Horno Crematorio 3 (n=6)

	$\mu\text{g}/\text{m}^3$							
	As	Hg	Cd	Pb	V	Cu	Fe	Al
Promedio	1.115	2.153	1.667	0.588	1.981	0.465	0.477	0.549
Valor Máx.	2.268	3.294	3.457	1.338	3.143	1.012	0.704	1.055
Valor Min.	0.588	1.317	0.877	0.313	0.963	0.163	0.328	0.182
σ	0.610	0.852	0.939	0.398	0.921	0.287	0.158	0.338

Con la finalidad de determinar si existía alguna variable (peso, edad, género, temperatura, número de servicio, horno) que interfiriera en la emisión de metales. Se realizó la correlación de coeficiente de Spearman con una cola y un nivel de significancia del 95%; la Tabla 28 muestra las correlaciones para cada uno de los metales cuantificados; estas correlaciones ya involucran las emisiones de los tres hornos crematorios.

El arsénico presenta una correlación ($r=0.742$) con el horno crematorio, esto quiere decir que las emisiones de este metal dependen del horno que las está emitiendo, en este análisis las emisiones más bajas se presentaron en el horno 3; este elemento a su vez se vio afectado por la

temperatura, al ser una correlación también positiva indica que a mayor temperatura mayor emisión de arsénico hubo.

El cobre y aluminio se vieron afectados por el género del cuerpo cremado, presentando emisiones más altas en el género femenino, para el Cu esto puede ser ocasionado debido a que durante el período de embarazo los niveles de Cu aumentan por los cambios hormonales que se tienen durante el período de gestación (Taboada, 2017).

Tabla 28. Correlaciones de Spearman para metales, n=16 y p>0.05

	Horno Crematorio	Temperatura	Genero	Edad	Número de servicio
Arsenico	0.742	0.615	-	-	-
Mercurio	-	-	-	-	-
Cadmio	-	-	-	-	-
Plomo	-	-	-	-	-
Vanadio	-	-	-	-	-
Cobre	-	-	0.548	-	-
Hierro	-	-	-	-	-
Aluminio	0.529	-	0.642	-	-

Por otro lado, las emisiones de mercurio, cadmio, plomo, vanadio y hierro no se ven afectadas por ninguna variable ni por el horno crematorio que los esté emitiendo.

3.6 Factores de emisión

3.6.1 Factores de emisión de PM_{2.5}

Las Tablas 29, 30 y 31 muestra los factores de emisión y la concentración de PM_{2.5} obtenidos en cada uno de los servicios del horno 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 29. Factores de emisión y concentración de PM_{2.5}, Horno Crematorio 1

HORNO CREMATORIO 1		
ITEM	[PM _{2.5}] mg/m ³	FE (g kg ⁻¹ cuerpo)
1	32.23	0.60
2	8.10	0.19
3	12.51	0.44
4	15.26	0.44
5	11.44	0.75
6	12.06	0.73
7	22.29	0.64
8	14.50	0.50
9	24.00	0.73
10	10.95	0.48
11	12.54	1.02
12	8.41	0.26
13	10.01	0.41

Tabla 30. Factores de emisión y concentración de PM_{2.5}, Horno Crematorio 2

HORNO CREMATORIO 2					
ITEM	[PM _{2.5}] mg/m ³	FE (g kg ⁻¹ cuerpo)	ITEM	[PM _{2.5}] mg/m ³	FE (g kg ⁻¹ cuerpo)
1	54.50	0.60	11	25.94	0.68
2	71.36	1.24	12	64.53	0.91
3	83.62	1.46	13	39.80	0.63
4	70.89	1.80	14	76.77	2.29
5	61.54	0.76	15	30.46	0.96
6	91.52	2.40	16	52.04	2.28
7	36.36	0.53	17	144.45	1.80
8	50.83	0.90	18	56.50	2.13
9	15.19	0.32	19	86.44	1.18
10	16.36	0.32	20	124.74	2.66

Tabla 31. Factores de emisión y concentración de PM_{2.5}, Horno Crematorio 3

HORNO CREMATORIO 3		
ITEM	[PM _{2.5}] mg/m ³	FE (g kg ⁻¹ cuerpo)
1	45.24	1.28
2	68.78	1.32
3	3.52	0.14
4	17.75	0.96
5	14.76	1.20
6	85.71	1.22
7	47.10	1.93
8	17.66	0.52
9	36.10	2.54
10	59.43	1.69

Para determinar de que dependía el factor de emisión, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman con cada una de las variables. Con lo que se concluye que el factor de emisión tiene una correlación positiva ($r=0.569$) con el horno crematorio de donde proviene la emisión y a su vez con la concentración de partículas emitidas ($r=0.868$); la concentración de partículas depende del horno que las está emitiendo, esto puede deberse a que la tecnología con la que cuenta cada uno de los hornos es diferente, sin embargo, no existe correlación entre la eficiencia de combustión. Cada una de estas correlaciones se llevó a cabo con un 95% de significancia.

Para corroborar que el horno 2 y 3 no presentaban diferencias significativas entre ellos, se empleó la prueba de Mann Whitney con un 95% de significancia (Anexo 9). Las características del cuerpo como son edad, peso y género no presentan diferencias significativas para cada uno de los hornos, mientras que existe una diferencia significativa entre CO y temperatura para cada uno de los hornos.

Debido a que los hornos 2 y 3 son de tecnologías similares, se realizó la comparación entre ellos y el horno 1. Se comprobó con la prueba de Mann-Whitney con un 95% de significancia (Tabla 32) que existe una diferencia significativa en cuanto a las partículas que son emitidas y a su vez esto hace que los FE también sean distintos para ambos hornos. La variable isocinetica de igual manera presenta una diferencia significativa, en cuanto al peso no existe diferencia lo que indica que ambos hornos trabajan con cuerpos similares.

Tabla 32. Prueba de Mann-Whitney para variables de los hornos 2,3 y horno 1

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Factor de emisión entre hornos	Ho:No existe diferencia entre los factores de emisión de los hornos 2,3 y 1 Ha:Existe diferencia entre los factores de emisión de los hornos 2,3 y 1	0.95	0.001	Se rechaza Ho
Concentración de partículas	Ho:No existe diferencia entre las emisiones de PM _{2.5} de los hornos 2,3 y 1 Ha:Existe diferencia entre las emisiones de PM _{2.5} de los hornos 2,3 y 1		0.01	Se rechaza Ho
Isocinetismo entre los hornos	Ho:No existe diferencia entre el isocinetismo alcanzado en los hornos 2,3 y 1 Ha:Existe diferencia entre el isocinetismo alcanzado en los hornos 2,3 y 1		0.001	Se rechaza Ho
Peso de los cuerpos	Ho:No existe diferencia entre los pesos de los cuerpos Ha:Existe diferencia entre los pesos de los cuerpos		0.956	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Debido a que al realizar los análisis estadísticos como conjunto no arrojaba información relevante, se tomó la decisión de realizar el análisis de manera individual para cada uno de los hornos.

La Figura 43 muestra las correlaciones realizadas con el coeficiente de correlación de Spearman con un 95% de significancia para el horno 1 y la concentración de partículas; se observa que existe una correlación directa entre el peso del cuerpo y la temperatura, es decir, a mayor peso aumenta

la temperatura. La correlación que se presenta entre el oxígeno y la temperatura es inversamente proporcional lo que indica que, a menor temperatura, mayor oxígeno. Se debe mencionar que el oxígeno fue medido a la salida del proceso (en la chimenea), sin embargo, esto ocurre debido a las prácticas de cremación ya que se debe abrir la compuerta para mover los residuos permitiendo la entrada de aire a temperatura ambiente disminuyendo de esta forma la temperatura y aumentando el suministro de oxígeno.

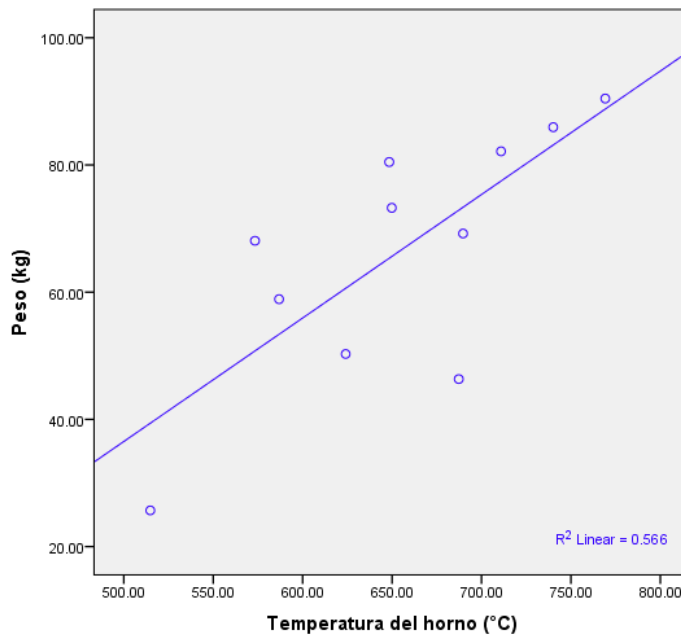


Figura 43. Correlación de Spearman para temperatura y peso en horno 1 (r=0.773)

En este análisis estadístico con una $r=0.656$ se corrobora de nuevo que el factor de emisión depende de la concentración de partículas, a mayor concentración de partículas mayor es el factor de emisión.

De igual manera se realizaron las correlaciones de los hornos 2 y 3, con los datos iniciales, con la finalidad de observar la tendencia que presentaba cada una de las variables. Sin embargo, basándonos en el apartado 1.6 (Condiciones) y el apartado 8.3.4 inciso b del método 201-A de la EPA donde indica que para $PM_{2.5}$ la variación aceptable del muestreo isocinético es de 80 a 120% se descartaron 17 muestras que estaban por debajo o por arriba de este rango. Al realizar esta depuración e incluyendo los valores de CO_2 mediante el coeficiente de correlación de Spearman con un nivel de significancia del 95% se obtuvo una correlación positiva de $r=0.863$ para los factores de emisión y la concentración de partículas, es decir, a mayor concentración de partículas mayor factor de emisión.

La Tabla 33 muestra los FE promedio para los tres hornos crematorios.

Tabla 33. Factores de emisión promedio de PM_{2.5} para los 3 hornos crematorios

Horno Crematorio	FE (g kg ⁻¹ cuerpo)
1, n=13	0.55 ± 0.10
2, n=20	1.29 ± 0.19
3, n=10	1.23 ± 0.33

3.6.2 Factores de emisión de CO

Para estimar los factores de emisión de CO en los 3 hornos crematorios se utilizaron las concentraciones promedio emitidas: 80.69 ppm (Horno 1), 328.36 ppm (Horno 2) y 169.22 ppm (Horno 3), peso promedio del cuerpo 64.22 kg, 62.80 kg y 72.58 kg para los hornos 1, 2 y 3 respectivamente y volumen promedio 2363.06 m³ (Horno 1), 1191.73 m³ (Horno 2) y 2364.34 m³ (Horno 3). Las emisiones de CO expresadas en mili gramos para el crematorio 1, 2 y 3 son 6395.74 mg, 19048.26 mg y 12101.71 mg respectivamente.

Los FE para los 3 hornos crematorios se observan en la Tabla 34.

Tabla 34. Factores de emisión para CO

Horno Crematorio	FE (mg kg ⁻¹ cuerpo)
1, n=13	109.28
2, n=20	326.67
3, n=10	194.24

Se utilizó la prueba de Mann-Whitney con una cola y una significancia el 95% para conocer si existía diferencia significativa entre los factores de emisión de los hornos, se concluyó que no existe evidencia estadística que indique que existe una variación entre los factores de emisión ($p=0.943$, $p=0.119$ y $p=0.157$). De acuerdo con el coeficiente de correlación de Spearman ($r=0.92$) el FE como era de esperarse depende de los gramos emitidos a la atmósfera de CO.

3.6.3 Factores de emisión de carbono elemental y carbono orgánico

Las Figuras 44 y 45 muestran el diagrama de cajas y bigotes de los FE de carbono elemental y orgánico para cada uno de los hornos. Se observa una diferencia significativa entre el horno 2 con el horno 1 y 3, sin embargo, al realizar la prueba de Mann-Whitney con un nivel de significancia del 95% (Anexo 11) se concluye que únicamente existe evidencia estadística para afirmar que los factores de emisión son diferentes entre los hornos 1 y 2, y los hornos 1 y 3.

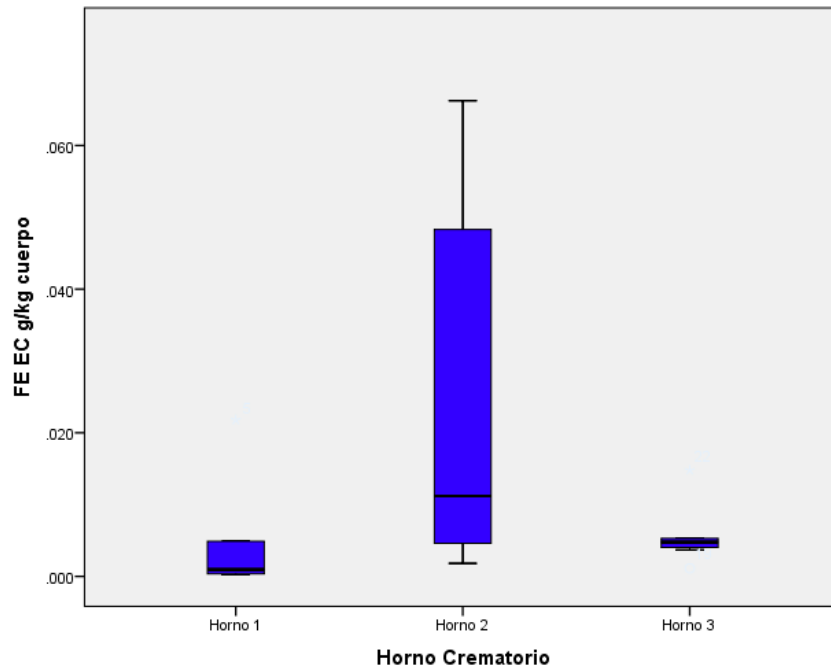


Figura 44. Diagrama de cajas y bigotes para FE de carbono elemental (g kg^{-1} cuerpo) y hornos crematorios

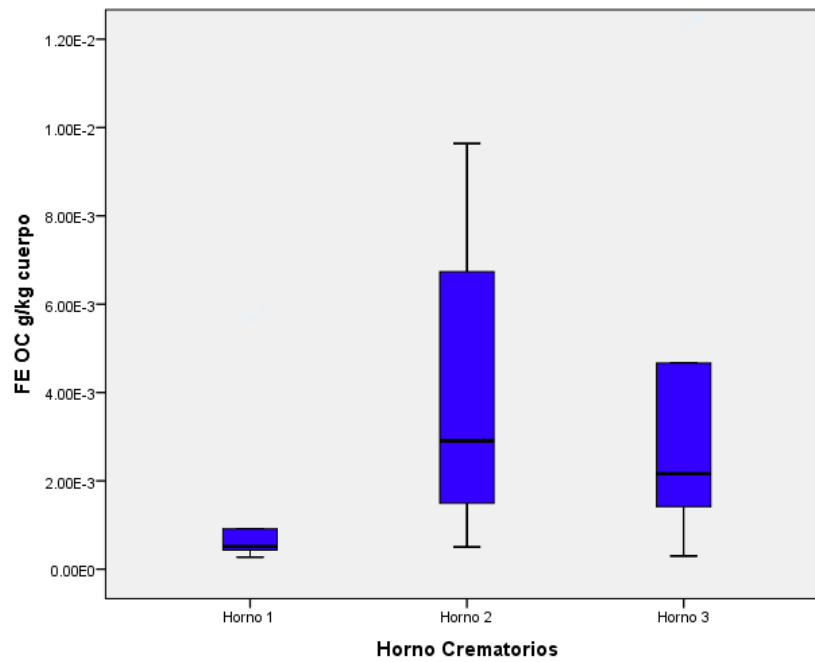


Figura 45. Diagrama de cajas y bigotes para FE de carbono orgánico (g kg^{-1} cuerpo) y hornos crematorios

La Tabla 35 muestra los FE obtenidos para cada uno de los hornos crematorios, estos fueron calculados en base a la cantidad de carbono elemental y orgánico que se encontraba en los filtros, y el peso del cuerpo.

Tabla 35. Factores de emisión para EC y OC

Horno Crematorio	FE EC g kg ⁻¹	FE OC g kg ⁻¹
1, n=6	0.0048 ± 0.0006	0.0013 ± 0.0038
2, n=9	0.0319 ± 0.0014	0.0037 ± 0.0168
3, n=9	0.0194 ± 0.0130	0.0149 ± 0.0162

Del carbono total encontrado en los filtros, el carbono elemental representa en promedio el 74.32% teniendo únicamente el 25.67% de carbono orgánico, esto puede deberse a que en la segunda fase del proceso de cremación que se da entre los 500 y 650°C son eliminados los compuestos orgánicos (Warren *et al.*, 1997).

3.6.4 Factores de emisión para HAP's

La Tabla 36 presenta los factores de emisión de HAP's para cada uno de los hornos, en el caso de ND fueron aquellos compuestos que no fue posible cuantificarlos.

Tabla 36. Factores de emisión para HAP's

	FE µg kg ⁻¹ cuerpo		
	Horno 1	Horno 2	Horno 3
Naftaleno	0.0012	0.0018	0.0011
2-Metilnaftaleno	0.0005	0.0004	0.0004
Acenaftileno	ND	0.0035	0.0010
Acenafteno	ND	ND	ND
Fluoreno	ND	0.0012	0.0003
Fenantreno	0.0039	0.0781	0.0055
Antraceno	0.0005	ND	0.0054
Fluoranteno	0.0134	1.0266	0.0273
Pireno	0.0210	1.8815	0.0482
Benzo[a]antraceno	0.0138	0.3093	0.0291
Criseno	0.0225	0.0237	0.0106
B[b]F + B[k]F	0.0560	0.7126	0.1796
Benzo[a]pireno	0.0209	0.7654	0.1975
Indeno[1,2,3-cd]pireno	0.0517	0.5608	0.2225
Dibenzo[a,h]antraceno	ND	0.0164	0.0048
Benzo[ghi]perileno	0.0893	0.9725	0.5324

Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman con un nivel de significancia del 95% para determinar si los factores de emisión dependían de alguna variable de la cremación y/o característica del cuerpo cremado (número de servicio, temperatura del horno, género, edad y peso). Para el horno crematorio 1 no hubo correlaciones entre los HAP's y las variables contempladas; únicamente hubo una excepción con el benzo[a]pireno que tuvo una correlación

positiva con la emisión de partículas ($r=0.685$) lo que significa que cuando existe mayor emisión de partículas también hay un aumento en la emisión de este HAP.

Los hornos 2 y 3 presentaron en los HAP's con 4, 5 y 6 anillos aromáticos tuvieron una correlación positiva ($r=0.75$, $r=0.82$) con la concentración de partículas, mientras que los de 2 y 3 anillos aromáticos no presentaron correlaciones.

3.6.5 Factores de emisión de metales

Para determinar los factores de emisión de cada uno de los metales en los 3 hornos crematorios se utilizaron las cantidades promedio cuantificadas: As 1.67 μg , Hg 2.37 μg , Cd 1.50 μg , Pb 0.60 μg , V 2.07 μg , Cu 0.63 μg , Fe 0.01 μg y Al 0.47 μg , peso promedio del cuerpo 66.53 kg y volumen promedio 1973.04 m^3 . Los FE de emisión para metales son expresados en μg del metal por kg de cuerpo, se observan en la Tabla 37.

Tabla 37. FE de metales en los hornos crematorios

	FE $\mu\text{g kg}^{-1}$ cuerpo
As	0.04 \pm 0.05
Hg	0.06 \pm 0.08
Cd	0.04 \pm 0.06
Pb	0.01 \pm 0.02
V	0.05 \pm 0.05
Cu	0.02 \pm 0.03
Fe	0.01 \pm 0.02
Al	0.01 \pm 0.009

Los dos principales métodos funerarios son la cremación y la inhumación, ambos afectan a distinto nivel el medio ambiente. La cremación emite a la atmósfera óxidos de carbono, dioxinas y otros contaminantes. Se calcula que un 16% de la contaminación por mercurio en el aire deriva de las cremaciones.

A modo de resumir lo obtenido en los tres hornos crematorios la Tabla 38 muestra las concentraciones de cada uno de los contaminantes cuantificados en los tres hornos crematorios.

Tabla 38. Compuestos cuantificados en hornos crematorios

	Horno Crematorio 1	Horno Crematorio 2	Horno Crematorio 3	
PST [mg/m ³]	65.35	52.74	111.9	
PM _{2.5} [mg/m ³]	22.15	101.67	106.78	
CO [ppm]	67.23	298.63	72.33	
EC [mg/m ³]	0.027	0.206	0.162	
OC [mg/m ³]	0.025	0.104	0.1	
HAP's (2-3 anillos) [μg/m ³]	0.34	4.99	1.01	
HAP's (4-6 anillos) [μg/m ³]	16.06	367.99	93.96	
Metales [μg/m ³]	As	4.39	2.2	1.11
	Hg	4.66	3.04	2.15
	Cd	2.74	1.49	1.66
	Pb	1.19	0.75	0.58
	V	3.13	2.99	1.98
	Cu	1.37	0.92	0.46
	Fe	0.49	0.6	0.47
	Al	0.61	0.64	0.54

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Para partículas suspendidas totales se excedió el LMP (40 mg/m^3) de la norma vigente (NADF-017-AIRE-2017) con un promedio de 65.35 mg/m^3 , 52.74 mg/m^3 y 119.9 mg/m^3 para los hornos 1, 2 y 3 respectivamente. Las emisiones de CO también excedieron el límite establecido por la norma (LMP0120 mg/m^3) con un promedio de 6805.24 mg/m^3 , 28934.52 mg/m^3 y 7265.70 mg/m^3 para los hornos 1, 2 y 3 respectivamente.

Se adaptó el método 201-A de la EPA para la cuantificación de partículas $\text{PM}_{2.5}$, consiguiendo porcentajes de isocinetismo entre los rangos de 80 y 120%. Los hornos crematorios 2 y 3 fueron los que más emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ registraron con concentraciones promedio de 101.67 mg/m^3 y 106.78 mg/m^3 respectivamente. Los análisis estadísticos arrojaron una correlación positiva ($r=0.868$) con los FE, es decir, entre mayor era la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ mayor era el FE. Sin embargo, las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ no se vieron afectadas por las características del cuerpo (género, edad, peso, enfermedades).

La forma en la que el operario maneja el horno influye significativamente en las emisiones de CO, ya que no se cuenta con el proceso estandarizado. De acuerdo al coeficiente de correlación de spearman ($r=-0.698$) se corroboró que la cantidad de oxígeno emitido a la atmósfera depende del peso del cuerpo cremado, el signo negativo indica que a menor peso mayor es la emisión de oxígeno. Las emisiones de CO no se vieron afectadas por las características del cuerpo ni por las condiciones de operación de los hornos crematorios.

Sin embargo, el peso es una variable que interfiere en las emisiones de EC y OC, entre mayor sea el peso del cuerpo cremado mayor es la emisión; mientras que el carbono total se correlaciona de forma positiva ($r=0.828$) con el género, teniendo mayores emisiones en el género masculino. Del carbono total promedio de los tres hornos crematorios el 74.32% corresponde a EC dejando únicamente un 25.67 de OC.

Aunque en la cuantificación de EC y OC se tuvo una relación positiva con el peso del cuerpo cremado, no fue el caso de los factores de emisión ya que no se encontró relación alguna con ninguna de las variables contempladas.

Con respecto a la cuantificación de HAP's y con base en la estadística realizada se concluyó que la emisión de estos compuestos con excepción del naftaleno y 2-metilnaftaleno está relacionada con el peso del cuerpo cremado; el acenaftileno, fluoreno y antraceno inclusive están relacionados

con el género del cuerpo teniendo mayores emisiones en el género masculino. El benzo[*a*]pireno se cuantificó en los tres crematorios representando el 15%, 33% y 31% de las emisiones totales de HAP's cancerígenos para los hornos 1, 2 y 3 respectivamente.

Por su parte, el Hg fue el metal más abundante en los tres hornos crematorios con concentraciones promedio de 4.66 µg/m³, 3.042 µg/m³ y 2.153 µg/m³, sin embargo, no se presentó correlación con ninguna de las variables y/o las condiciones de operación de los hornos crematorios. El género influyó en el cobre y aluminio, teniendo concentraciones más altas en los cuerpos de género femenino.

Esta investigación sirvió para corroborar que la cremación es un proceso cuyas condiciones no pueden ser controladas debido a que las características del cuerpo son diferentes entre cada servicio; aunque el peso influyó en algunos contaminantes, no lo hizo en todos. En México la cremación se realiza sin el ataúd lo que está considerado como buena práctica; sin embargo, los tres hornos requieren de un equipo que les permita controlar las emisiones que generan a la atmósfera y con esto poder cumplir con el límite establecido por la normatividad vigente.

REFERENCIAS

Australian Cemeteries and Crematoria Association (ACCA). 2004. Environmental guidelines for crematoria and cremator.

Agencia Valenciana de Salut. 2013. Informe sanitario emitido por la unidad de sanidad ambiental, de la dirección general de salud pública, sobre la evaluación de impacto en salud de un tanatorio-Crematorio en Sant Joan D'Alacant.

Agency, E. P. 2008. Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales. Suiza.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2000. Medical management guidelines for acute chemical exposure. Atlanta, GA: Department of Health and Human Services, p.22.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2009. Toxicological Profile for Carbon Monoxide. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

AIDA, 2009. El carbono Negro: Concepto, efectos climáticos y oportunidades en su control: Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente.

Albers PH, 1995. "Handbook of Ecotoxicology", Lewis Publishers, Boca Raton, 330-355.

Babu, S.s., y Moorthy K.K. 2001. Anthropogenic impact in aerosol black carbon mass concentration at a tropical coastal station: A case study. CURRENT SCIENCE, 81, 1208-1214.

Bachmann, J. 2009. BLACK CARBON: A Science/Policy Primer. Pew Center on Global Climate Change.

Bahner, M. A.; Weitz, K. A.; Zapata, A.; De Angelo, B. 2007. Use of black carbon and organic carbon inventories for projections and mitigation analysis. Technical paper. RTI International and U. S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division.

Baukal Jr. Charles E. 2001 The John Zink Combustion Handbook, John Zink.

Beard Taylor J., Lachetta Antonio, Lilleleht Lembit 1980 APTI Course 427 Combustion Evaluation, EPA.

Benner, B. A., Bryner, N. P., Wise, S. A., Mulholland, G. H., Lao, R. C. y Fingas, M. F. 1990. *Environmental Science and Technology* 24, 1418-1427.

Björseth A. y Ramdahl T., Eds 1985. *Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Vol. 2, Emission Sources and Recent Progress in Analytical Chemistry*, Nueva York, Marcel Dekker.

Bond, T.C., Bhardwaj, E., Dong, R., Jogani, R., Jung, S., Roden, C., Trautmann, N.M. 2007. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2018.

Cachier.H., Liousse, C., Buat-Menard, P., Gaudichet, A., 1995. Particulate content of savanna fire emissions. *J. Atmospheric Chem.* 22, 123-148.

Cai QY, Mo CH, Wua QT, Katsoyiannis A, Zeng QY. 2008. The status of soil contamination by semivolatile organic chemicals (SVOCs) in China: A review. *Science of the Total Environment* 39(9): 1609-1625.

Carnicer, J. M. 2006. *Contaminación ambiental*. EOI.

Carreño Laura. 2001. La acción del fuego sobre el cuerpo humano: la antropología física y el análisis de las cremaciones antiguas. *CYPSELA* 13, 2001. 89-100.

Chow, J., *et al.* 2007. The improve_a temperatura protocol fot termal/optical carbon analysis: Maintaining consistency with a long-term database TOR. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1014-1023.

Crespo. E., 2007. *Contaminación atmosférica: Técnicas de muestreo*, Madrid: EOI, Escuela de Organización Industrial.

DEFRA, Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK. *Mercury emissions from crematoria* 2003.

DOF, 2001. Norma Mexicana NMX-AA-010-SCFI-2001. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA - FUENTES FIJAS – DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE PARTÍCULAS CONTENIDAS EN LOS GASES QUE FLUYEN POR UN CONDUCTO – MÉTODO ISOCINÉTICO. México: Diario Oficial de la Federación. 18 de abril de 2001.

EMEP/EEA. 2013. *Emission Inventory Guidebook 2013. Cremation*. Recuperado el 2017, de: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapter/5-waste/5-c-1-b-v/view>.

- Enrique Crespo. 2007. Técnicas de Muestreo. Escuela de Negocios (EOI).
- EPA. 2010. Quantitative Health Risk Assessment for Particulate Matter.
- Feng, J., Chan, C. K., Fang, M., Hu, M., He, L., Tang, X., 2006. Characteristics of organic matters in PM_{2.5} in Shanghai. *Chemosphere* 64, 1393-1400.
- Flores, J., 1997. Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios. En: *Introducción a la toxicología ambiental*. México: ECO, pp. 123-147.
- Fundación Tierra. 2013. Servicio funerario ecológico sobre contaminación atmosférica generada en instalaciones de horno crematorios y la adaptación de requisitos SFE 07:02 referentes a emisiones de hornos crematorios.
- Gardiner Jr W.C. 1999. *Gas-Phase Combustion Chemistry*, Springer
- González, G., 2016. Adaptación del método isocinético para la toma de muestra de partículas por quema de biomasa, México.
- Gúzman-Torres D., Eiguren-Fernández A., Cicero-Fernández P., Maubert-Franco M., Retama-Hernández A., Villegas R.R. y Miguel A. H. 2009. Effects of meteorology on diurnal and nocturnal levels of priority polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental and organic carbon in PM₁₀ at a source and a receptor area in Mexico City. *Atmos. Environ.* 43. 2693-2699.
- Han. Y *et al.* 2007. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char and soot-EC. *Chemosphere*. 569-574.
- Hernández, J. J., Ballesteros, R., Aranda, G. 2013. Characterisation of tars from biomass gasification: Effect of the operating conditions. *Energy*. 333-342.
- Hildemann, L. M., Klinedinst, D. B., Klouda, G.A., Currie, L.A., y Cass, G. R. 1994. Sources of urban contemporary carbon aerosol. *Environmental Science and Technology*, 28(9), 1565-1576.
- Huiji, L, Jialiang, F, Guoying, S, Senlin, L, Jiamo, F, Ping'an, P. Ren, M, 2008. The PCDD/F and PBDD/F pollution in the ambient atmosphere of Shanghai, China. *Chemosphere* 40, 576-583.
- International Agency for Research on Cancer. 2010. Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks to humans. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures, Vol. 92, Lyon, France, World Health Organization, Switzerland. 868 p.

ICCT, 2009. El conocimiento científico actual sobre lo impactos del carbono negro en el cambio climático y las estrategias recomendadas para reducir sus emisiones – Una síntesis para la toma de decisiones, Londres, UK: The International Council on Clean Transportation.

ICON. 28 de septiembre de 2018. Obtenido de <https://www.gasdetectorshop.com/0024-8515-Bacharach-Fyrite-Insight-Plus-Basic-Kit-p/0024-8515.html>

INECC. 3 de noviembre de 2018. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/263/equipos.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Dirección Regional Centro; Coordinación Regional de Estadística. Recuperado el 2017, de: <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>

Inventario Nacional de Emisiones de Gses de Efecto Invernadero. 2018. México.

IPCC. 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change

Jacobson M. Z. 2007. Black carbon and global warning. In: Representatives U.H.o., ed. Washington DC.

Jung, J., Lee, S., Kim, D., Lee, H., Oh, S., 2014. Quantitative determination of the biomass-burning contribution to atmospheric carbonaceous aerosols in Daejeon, Korea, during the rice-harvest period. *Atmos. Environ.* 89, 642-650.

Kumar, K, R., Narasimbulu, K. Balakrishnaiah, G., SureshKumarReddy, B., Rama Gopal, K., Reddy, R.R., SureshBabu, S. 2011. Characterization of aerosol black carbon over a tropical semi-arid region of Anantapur, India. *AtmosphericResearch*, 100, 12-27.

Lim, M. C., Ayoko, G. A., Morawska, L., Ristovski, Z. D., Jayaratne, E. R. 2007. Influence of fuel composition on polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from a fleet of in-service passenger cars. *Atmospheric Environment*. 150-160.

Llobet JM, Schuhmacher M, Domingo JL. Spatial distribution and temporal variation of metals in the vicinity of a municipal solid waste incinerator after a modernization of the flue gas cleaning systems of the facility. *Sci Total Environ* 2002; 205-214.

Lu, H., Zhu, L. y Chen, S. 2008. Pollution level, phase distribution and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor air at public places of Hanzhzhou, China. *Environmental Pollution*. 152, 569-575.

Maertens, R., Bailey, J. y White, P. 2004. The mutagenic hazards of settled house dust: a review. *Mutation Research*. 567, 401-425.

Ma L, Chu S, Cheng H, Wang X, Liu X, Xu X. 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in subsoil from outskirts of Beijing. People's Republic of China. *Geoderma* 129: 200-210.

Magee Scientific. 2005. Operations Manual Aethalometer.

Maliszewska BK, Smreczak B, Klimkowicz A. 2009. Concentrations, sources, and spatial distribution of individual polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soils in the Eastern part of the EU; Poland as a case study. *Science of Total Environment* 407: 3746-3753.

Martínez, E. 2017. Análisis de metales por espectrofotometría atómica. Microlab Industrial.

Mastandrea, C., Chichizola, C., Ludueña, B., Sánchez, H., Álvarez, H., Gutiérrez, A. 2005. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Toxicología*.

Montenegro, R. 2005. Informe sobre el impacto ambiental y sanitario de los hornos crematorios. Córdoba: FUNAM.

Moreno, L., 2014. Anteproyecto para la red de monitoreo atmosférico de carbono negro en aire ambiente para la zona metropolitana de Toluca. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Morillo E, Romero AS, Madrid L, Villaverde J, Maqueda C. 2008. Characterization and Sources of PAHs and Potentially Toxic Metals in Urban Environments of Sevilla (Southern Spain). *Water Air Soil Pollution* 187: 41-51.

Mugica, V., 2010. EMISIONES DE CARBONO NEGRO EN PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DE LA QUEMA DE CAÑA DE AZÚCAR. Ciudad de México: SEMARNAT; UAM.

Never Noel. 1998. Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, Mc Graw Hill.

Nobuo, T., Masaki, T., Takeshi, F., Hisayuki, T., Shoji, E., 2000. PCDDs/DFs emissions from crematories in Japan. *Chemosphere*, 575-586.

Norma técnica para emisiones a la atmósfera de fuentes fijas y de procesos industriales (NT001). 2014. Quito, Ecuador.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2011. Afrontar el reto mundial de garantizar un aire limpio. http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/air_pollution_20110926/es.

Pan American Health Organization. 2004. Management of Dead Bodies in Disaster Situations. Regional Office of the World Health Organization.

Peterson, M.R y Richards, M. H. 2002. Thermal optical transmittance analysis for organic, elemental carbonate, total carbon and OCX2 in PM_{2.5} by the EPA/NIOSH. Simposio de métodos y tecnologías de medición de calidad de aire. San Francisco CA.

Petzold. A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., Zhang, X. 2013. Recommendations for reporting “black carbon” measurements. Atmos Chem Phys 13, 8365-8379.

Ramos-de Viesca M., Ávila-R, M. E. 2002. La cremación. Un capítulo en la salud pública de México. Gaceta Médica de México, 1-7.

Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz-Lagos, M., y González, E.E. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16 (2), pp. 66-77.

Román Alberto Pérez Balán, 2013. Tesis: Estudio del contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos y metales en partículas atmosféricas de diferentes diámetros aerodinámicos de la Comarca Lagunera, México. Centro de investigación en materiales avanzados (CIMAV).

Rojas Bracho, L., Garibay Bravo, V. 2003. Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?, ¿podemos hacer algo? Gaceta Ecológica, Número 69, 29-44.

Rojas, N. Y., Milquez, H. A., Sarmiento, H. 2011. Characterizing priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in particulate matter from diésel and palm oil-based biodiesel B15 combustion. Atmospheric Environment. 6158-6162.

Santiago de la Rosa, Naxieli. 2018. Tesis: Factores de emisión de contaminantes atmosféricos y climáticos, y evaluación del potencial oxidativo y cancerígeno de las partículas finas por la quema de residuos agrícolas. UAM-Azcapotzalco.

Schofield, K. 2008. The enigmatic mechanism of the flame ionization detector: Its overlooked implications for fossil fuel combustion modeling. Progress in Energy and Combustion Science. 330-350.

Schorr Marvin M. 1991. Nox. Emission Control for Gas Turbines: A 1991 Update on Regulations and Technology, Energy Engineering, Vol. 88, No.6.

SMA, 2010. Fuentes de emisión de Carbono Negro en el Estado de México, Estado de México: Secretaría de Medio Ambiente.

Secretaría del Medio ambiente (15 de febrero de 2018). Norma Ambiental para el Distrito Federal, NAEDF-017-AIRE-2017, México, Ciudad de México.

Seekel, W.R., Lanoier, M.P. 1987. Municipal Waste Combustion Study: Combustion Control of MSW Combustors to Minimize Emission of Trace Organics, EER Corporation, Irvine Ca.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. México rumbo a la COP21, México.

Spalding Brian D. 1983. Combustión y Transferencia de Masa, CECSA.

Taboada Lugo, N. 2017. El zinc y el cobre: micronutrientes esenciales para la salud humana. Volumen 11. No. 2.

Takaoka M., K. Oshita, N. Takeda, S. MArisawa. 2010. Mercury emission from crematories in Japan. Atmospheric chemistry 10: 3665-3671.

Thiele S. Brummer GW. 2002 Bioformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil under oxygen deficient conditions. Soil Biology Biochemistry 34: 733-735.

Tillman, David A. 1991. The Combustion of Solid Fuels and Wastes, E.d. Academic Press, Inc.

Trancho, G. J. 2010. Análisis antropológico de las necrópolis de cremación. Revista Española de Antropología Física, 205-232.

La Gaceta. No. 15. 2015. Reglamento para la operación de hornos crematorios. Costa Rica.

Vione. D., Barra, S., de Gennaro, G., de Rienzo, M., Gilardoni, S., Perrone, M.G., Pozzoli. L., 2004. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere: Monitoring, Sources, Sinks and Fate. II: Sinks and Fate. Ann. Chim. 94, 257-268.

Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. 1999 Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, Ed. Springer.

Warren M. W. y Maples W. R. 1997. The anthropometry of contemporary comercial cremation. Journal Forensic Sciences 42(3): 417-423.

Wahl, J. 1982. Investigaciones de incendios mortuorios. Visión general de las posibilidades de edición y declaración de brigadas de bomberos, *PraehistorischeJournal* 57, 1, Berlin, 1-127.

Wei, W., Zhang, W., Hu, D., Ou, L., Tong, Y., Shen, G., Shen, H., Wang, X., 2012. Emissions of carbon monoxide and carbon dioxide from uncompressed and pelletized biomass fuel burning in typical household stoves in China. *Atmos. Environ.* 56, 136-142.

Yeager U.B. 1973. *Coal Burning-Design Parameters*, EPA.

Zhang HB, Luo YM, Wong MH, Zhao QG, Zhang GL. 2006. Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong soils. *Environmental Pollution* 14(1): 107-114.

Zhang, Y, Shao, M., Zhang Y, Zeng, L., He, L., Zhu, B., Wei, Y., Zhu, X., 2007. Source profiles of

ANEXOS

Anexo 1. Estadística básica de partículas suspendidas totales en Horno Crematorio 1, 2 y 3

		Horno Crematorio 1	Horno Crematorio 2	Horno Crematorio 3
mg/m ³	Promedio	65.35	52.74	111.90
	Valor Máx.	163.49	111.93	157.50
	Valor Min.	3.15	2.40	63.17
	σ	71.62	45.38	42.07

Anexo 2. Prueba de Mann-Whitney para concentración de partículas y número de servicio

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] con número de servicio	Ho: No existe diferencia entre los servicios 1 y 2 Ha: Existe una diferencia entre los servicios 1 y 2	0.95	0.694	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] con número de servicio	Ho: No existe diferencia entre los servicios 1 y 3 Ha: Existe una diferencia entre los servicios 1 y 3	0.95	0.171	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] con número de servicio	Ho: No existe diferencia entre los servicios 2 y 3 Ha: Existe una diferencia entre los servicios 2 y 3	0.95	0.113	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Anexo 3. Coeficiente de correlación de Spearman para PM_{2.5} y número de servicio

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] con número de servicio	Ho: No existe correlación entre la concentración de PM _{2.5} y el número de servicio Ha: Existe correlación entre la concentración de PM _{2.5} y el número de servicio	0.95	0.049	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Anexo 4. Coeficiente de correlación de Spearman para PM_{2.5} y el peso de los cadáveres

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] relacionada con peso	Ho: No existe correlación entre el peso y la concentración de partículas Ha: Existe correlación entre el peso y la concentración de partículas	0.95	0.930	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Anexo 5. Prueba de Mann-Whitney para concentración de partículas y edad

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
[PM _{2.5}] relacionada con la edad	Ho: No existe diferencia entre la edad y la concentración de partículas Ha: Existe diferencia entre la edad y la concentración de partículas	0.95	0.121	Se acepta Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Anexo 6. Coeficiente de correlación de Spearman para peso del cuerpo y oxígeno medido en la salida de la chimenea

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Peso del cuerpo y oxígeno a la salida	Ho:No existe correlación entre el cuerpo y el oxígeno a la salida de chimenea Ha:Existe correlación entre el cuerpo y el oxígeno a la salida de chimenea	0.95	0.003	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Anexo 7. Coeficiente de correlación de Spearman para peso del cuerpo y carbono orgánico y elemental

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Peso del cuerpo y carbono elemental	Ho:No existe correlación entre el cuerpo y carbono elemental Ha:Existe correlación entre el cuerpo y carbono elemental	0.95	0.015	Se rechaza Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Peso del cuerpo y carbono orgánico	Ho:No existe correlación entre el cuerpo y carbono orgánico Ha:Existe correlación entre el cuerpo y carbono orgánico	0.95	0.002	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación: Si $p > 0.05$ se acepta Ho

Anexo 8. Prueba de Mann Whitney para concentración de HAP's y hornos crematorios

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Concentración de hidrocarburos entre hornos 1 y 2	Ho:No existe diferencia entre la emisión de hidrocarburos entre los hornos 1 y 2 Ha:Existe diferencia entre la emisión de hidrocarburos entre los hornos 1 y 2	0.95	0.031	Se rechaza Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Concentración de hidrocarburos entre hornos 1 y 3	Ho:No existe diferencia entre la emisión de hidrocarburos entre los hornos 1 y 3 Ha:Existe diferencia entre la emisión de hidrocarburos entre los hornos 1 y 3	0.95	0.106	Se acepta Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Concentración de hidrocarburos entre hornos 2 y 3	Ho:No existe diferencia entre la emisión de hidrocarburos entre los hornos 2 y 3 Ha:Existe diferencia entre la emisión de hidrocarburos entre los hornos 2 y 3	0.95	0.217	Se acepta Ho

Anexo 9. Prueba de Mann-Whitney para variables de hornos crematorios

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
Factor de emisión entre hornos	Ho:No existe diferencia entre los factores de emisión de los hornos Ha:Existe diferencia entre los factores de emisión de los hornos	0.95	0.843	Se acepta Ho
Mónóxido de carbono medido a la salida	Ho:No existe diferencia entre las emisiones de CO de los hornos Ha:Existe diferencia entre las emisiones de CO de los hornos		0.01	Se rechaza Ho
Oxígeno medido a la salida	Ho:No existe diferencia entre las emisiones de oxígeno de los hornos Ha:Existe diferencia entre las emisiones de oxígeno de los hornos		0.104	Se acepta Ho
Temperatura entre los hornos	Ho:No existe diferencia entre las temperaturas alcanzadas en los hornos Ha:Existe diferencia entre las temperaturas alcanzadas en los hornos		0.001	Se rechaza Ho
Edad de los cuerpos ingresados	Ho:No existe diferencia entre la edad de los cuerpos ingresados en los hornos Ha:Existe diferencia entre la edad de los cuerpos ingresados en los hornos		0.134	Se acepta Ho
Peso de los cuerpos	Ho:No existe diferencia entre los pesos de los cuerpos Ha:Existe diferencia entre los pesos de los cuerpos		0.567	Se acepta Ho
Isocinetismo entre los hornos	Ho:No existe diferencia entre el isocinetismo alcanzado en los hornos Ha:Existe diferencia entre el isocinetismo alcanzado en los hornos		0.001	Se rechaza Ho

Anexo 10. Prueba de Mann-Whitney para carbono elemental y carbono orgánico de los hornos crematorios

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
FE de carbono elemental	Ho:No existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 2 Ha:Existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 2	0.95	0.018	Se rechaza Ho
FE de carbono orgánico	Ho:No existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 2 Ha:Existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 2	0.95	0.010	Se rechaza Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
FE de carbono elemental	Ho:No existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 3 Ha:Existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 3	0.95	0.077	Se rechaza Ho
FE de carbono orgánico	Ho:No existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 3 Ha:Existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 1 y 3	0.95	0.077	Se rechaza Ho

Comparación	Hipótesis	Intervalo de confianza (1- α)	Probabilidad (p)	Decisión
FE de carbono elemental	Ho:No existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 2 y 3 Ha:Existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 2 y 3	0.95	0.200	Se acepta Ho
FE de carbono orgánico	Ho:No existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 2 y 3 Ha:Existe diferencia entre los FE de carbono orgánico entre los hornos 2 y 3	0.95	0.627	Se acepta Ho

CONGRESOS Y PARTICIPACIONES

Esta investigación se presentó en:



Trabajo presentado: PM_{2.5} Emissions from Urban Crematoriums

Se participó en el desarrollo de la Norma de la Ciudad de México: NADF-017-AIRE-2017