

GESTIÓN AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Mabel Parada Rivera

Paúl Manobanda Pinto

Valeria Tapia González

CIDE
EDITORIAL



GESTIÓN AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Autores

Mabel Parada Rivera / Paúl Manobanda Pinto

Valeria Tapia González

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

Copyright © 2023
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador
Tel.: + (593) 04 2037524
<http://www.cidecuador.com>

ISBN: 978-9942-616-29-6

<https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.GA2616296>

Dirección editorial: Lic. Pedro Misacc Naranjo, Msc.

Coordinación técnica: Lic. María J. Delgado

Diseño gráfico: Lic. Danissa Colmenares

Diagramación: Lic. Alba Gil

Fecha de publicación: marzo, 2023



La presente obra fue evaluada por pares académicos experimentados en el área.

Catalogación en la Fuente

Gestión ambiental de la contaminación atmosférica / Mabel Parada Rivera, Paúl Manobanda Pinto, Valeria Tapia González.--Ecuador: Editorial CIDE, 2023.

304 p.: incluye tablas, figuras; 21 x 29, 7 cm.

ISBN: 978-9942-616-29-6



Semblanza de los Autores

"Esta obra es la mejor evidencia de la experiencia y conocimiento que poseen los autores en el campo de la gestión ambiental y la calidad del aire."

Mabel Parada Rivera

Catedrática de Área de Profesionalización de Ingeniería Química
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Catedrática de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, Tecnóloga Química Industrial, Ingeniera Química y Magíster en Protección Ambiental (ESPOCH-Ecuador); Magíster Scientiae en Ingeniería Química (ULA - Venezuela); Máster Universitario en Evaluación de la Calidad y Procesos de Certificación en Educación Superior (UNIR-España); Diplomado Superior en Auditoría de Gestión de la Calidad (UTPL - Ecuador).

Paúl Manobanda Pinto

Catedrático de la Facultad de Ciencias de la Vida
Universidad Estatal Amazónica

Catedrático de la Facultad de Ciencias de la Vida de la Universidad Estatal Amazónica (UEA), Ingeniero Químico (ESPOCH-Ecuador); Magíster en Protección Ambiental (ESPOCH-Ecuador); Magíster en Gerencia Empresarial, MBA (EPN-Ecuador); Magíster en Gestión del Riesgo de Desastres (UASB-Ecuador).

Valeria Tapia González

Técnico-Docente de la Facultad de Ciencias
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Técnico-Docente de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, Tecnóloga Química Industrial e Ingeniera Química (ESPOCH-Ecuador); Máster en Gestión y Auditorías Ambientales (ULE – España), Máster Universitario en Gestión ambiental y Energética en las Organizaciones (UNIR – España).



Agradecimientos

Queridos lectores,

En nombre de los autores de "Gestión Ambiental de la Contaminación Atmosférica", queremos expresar nuestro sincero agradecimiento por su interés en nuestro libro.

Este libro ha sido el resultado de un arduo trabajo y dedicación, que ha sido posible gracias al apoyo y la colaboración de muchas personas. En primer lugar, nos gustaría agradecer a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional y su paciencia mientras trabajábamos en este proyecto.

También queremos agradecer a nuestros colegas y amigos en el campo de la gestión ambiental y la calidad del aire, quienes nos brindaron su experiencia y conocimiento para ayudarnos a crear un libro completo y útil.

Por último, queremos expresar nuestro agradecimiento a nuestras instituciones, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y la Universidad Estatal Amazónica, así como a la editorial y su equipo editorial por su apoyo y guía en todo el proceso de publicación.

Esperamos que este libro sea de gran utilidad para todos aquellos interesados en la gestión ambiental y la calidad del aire, y contribuya a la preservación y protección de nuestro planeta para las generaciones futuras.

Atentamente,

Los autores



Semblanza de los autores	4
Agradecimientos	5
Introducción	14

CAPÍTULO 1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

1.1. Tipos de contaminantes del aire	18
1.2. Fuentes de contaminación del aire	19
1.2.1. Fuentes naturales	19
1.2.2. Fuentes antropogénicas	20
1.3. Efectos de los contaminantes del aire	21
1.3.1. Efectos locales	21
1.3.2. Efectos regionales	21
1.4. Efectos globales	22
1.5. Principales contaminantes del aire	24
1.5.1. Contaminantes criterio	25
1.5.2. Otros contaminantes de interés	35
1.5.2.1. Contaminantes orgánicos de no referencia	35
1.5.2.2. Contaminantes inorgánicos de no referencia	37
1.6. Química atmosférica	39
1.6.1. Formación de contaminantes secundarios	39
1.6.2. Formación de la lluvia ácida	42
1.7. Definiciones básicas de gases	42
1.7.1. Expresión de la temperatura de un gas	43
1.7.2. Expresión de la presión de los gases	44
1.7.3. La Ley de Dalton de Presión Parcial	45
1.7.4. Las leyes de Boyle y Charles	45
1.7.5. La ley de los gases ideales	46
1.7.6. Cálculo del peso molecular aparente de las mezclas de gases	48
1.7.7. Densidad del gas	48

1.7.8. Viscosidad, origen y definición de la viscosidad	49
1.7.9. Viscosidad de líquidos	49
1.7.10. Viscosidad de los gases	49
1.7.11. Capacidad calorífica específica	50
1.7.12. Número de Reynolds	51
1.7.13. Flujo laminar y turbulento	53
1.7.14. Análisis dimensional y transformación de unidades	53
1.7.15. Muestreo de la fuente de material particulado	55
1.7.16. Muestreo isocinético de la fuente	56
1.7.17. Contenido de humedad de un gas de chimenea	56
1.7.18. Fracción molar de un gas	56
1.7.19. Tubo de Pitot	57
1.7.20. Medidor de orificio	57

CAPÍTULO 2

METEOROLOGÍA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

2.1. Meteorología y atmósfera	60
2.1.1. Composición de la atmósfera	61
2.1.2. Capas de la atmósfera	61
2.1.3. Capa límite planetaria (Planetary Boundary Layer)	62
2.1.4. Importancia de la meteorología de la contaminación del aire	64
2.2. Balance térmico de la atmósfera	65
2.2.1. Radiación e insolación	65
2.2.2. Balance térmico	69
2.2.3. Distribución del calor	72
2.2.4. Calentamiento diferencial	74
2.2.5. Transporte de calor	75
2.2.6. Distribución mundial del calor	78
2.3. La estructura dinámica de la atmósfera	79
2.3.1. Circulación atmosférica	79
2.3.2. Presión atmosférica	79
2.3.3. Viento	80
2.3.4. Fuerza de Coriolis	82
2.3.5. Fuerza del gradiente de presión	83
2.3.6. Fricción	84
2.3.7. Sistemas de presión	85



2.3.8. Sistema de presión alta del Pacífico	85
2.3.9. Sistema de presión alta de las Bermudas	86
2.3.10. Circulación general	86
2.3.11. Masas de aire	88
2.3.12. Frentes	89
2.3.13. Entrampamiento frontal	92
2.4. Estaciones meteorológicas	94
2.4.1. Estaciones meteorológicas portátiles	94
2.4.2. Estaciones meteorológicas estacionarias	94
2.4.3. Sensores de estaciones meteorológicas	95

CAPÍTULO 3

MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

3.1. Métodos de análisis de la contaminación atmosférica	102
3.2. Tipos de monitoreo de contaminación atmosférica	103
3.3. Equipos de muestreo de emisiones	104
3.3.1. Analizadores semicontinuos	104
3.3.2. Equipos de monitoreo continuo de emisiones (CEMS)	105
3.3.2.1. Analizadores usados en los CEMS	106
3.3.3. Analizadores de gases	107
3.3.4. Muestro isocinético	108
3.3.5. Equipos de medición de emisiones vehiculares	109
3.4. Medición de la calidad del aire (Inmisión)	109
3.4.1. Equipos de muestreo pasivos	110
3.4.2. Equipos de muestreo activos	110
3.4.3. Equipos de muestreo activos-híbridos	111
3.4.4. Analizadores automáticos	112
3.4.5. Sensores remotos	112
3.4.6. Bioindicadores	113
3.5. Redes de monitoreo de la calidad del aire	113
3.5.1. Escalas de monitoreo	114
3.5.2. Otros aspectos para tener en consideración para la operación de una red de monitoreo	115
3.6. Métodos de referencia de muestreo	121
3.6.1. Métodos de monitoreo de emisiones al aire desde fuentes fijas establecido en el Anexo III - Acuerdo Ministerial 097.....	123
3.6.2. Métodos de medición de concentraciones de contaminantes criterio del aire..	124



3.6.3. Métodos de referencia aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA)	128
3.7. Muestreo isocinético de emisiones atmosféricas	143
3.7.1. Método 1. Selección de puntos de muestreo	146
3.7.1.1 Determinación de los puntos transversales de muestreo para chimeneas circulares	148
3.7.1.2. Ubicación y marcado de puntos transversales en chimeneas circulares	149
3.7.1.3. Determinación, ubicación y marcado de los puntos transversales de muestreo para chimeneas rectangulares	152
3.7.1.4. Determinación de puntos transversales en chimeneas pequeñas	153
3.7.1.5. Verificación de la ausencia de flujo ciclónico	154
3.7.2. Método 2. Determinación de la velocidad y caudal con Pitot Tipo “S”	154
3.7.2.1. Cálculo de la velocidad y caudal con Pitot Tipo “S”	157
3.7.3. Método 3. Análisis gaseoso del dióxido de carbono, oxígeno, exceso de aire y peso molecular	162
3.7.3.1. Cálculo de la masa molar en base seca	164
3.7.4. Método 4. Determinación de humedad	164
3.7.4.1. Cálculo del contenido de humedad en el gas de chimenea	165
3.7.5. Método 5. Determinación del material particulado	167
3.7.5.1. Cálculo del tamaño de la boquilla de la sonda	168
3.7.5.2. Cálculo del Factor K	169
3.7.5.3. Cálculo de la tasa de muestreo isocinético	170
3.8. Muestreo de gases de combustión	171
3.8.1. Determinación de monóxido de carbono	171
3.8.2. Determinación de óxidos de nitrógeno	172
3.8.3. Determinación de dióxido de azufre	173
3.9. Métodos de Prueba Condicionales (CTM).....	175
3.9.1. Confianza de la EPA en los CTMs.....	175
3.9.2. CTM-30.....	175
3.9.3. CTM-34.....	176
3.9.4. OTM-13.....	177
3.10. Análisis de errores en el muestreo de chimeneas	178
3.10.1. Clasificación de errores	180



CAPÍTULO 4
LEGISLACIÓN AMBIENTAL VIGENTE APLICADA

4.1.	Normativa regional para la gestión de la contaminación atmosférica.....	186
4.2.	Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas.....	192
4.2.1.	Fuentes fijas significativas.....	192
4.2.2.	Fuentes fijas no significativas.....	193
4.2.3.	Límites máximos permisibles.....	193
4.3.	Norma ISO/IEC 17025.....	210
4.4.	Norma de Calidad de Aire Ambiente.....	213
4.5.	Normativa aplicada a modelos de dispersión.....	216

CAPÍTULO 5
GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

5.1.	Instrumentos de gestión de la calidad del aire	220
5.2.	Implementación de un sistema de gestión de calidad del aire	221
5.3.	Estimación de emisiones	222
5.3.1.	Jerarquización de los métodos de estimación de emisiones	226
5.3.2.	Desarrollo de la base de datos	226
5.3.3.	Control y aseguramiento de la calidad	227
5.3.4.	Análisis de incertidumbre	228
5.3.5.	Diseño de la red de monitoreo y meteorología	229
5.3.6.	Operación de la red de monitoreo de calidad del aire	229
5.4.	Sistemas QA/QC para la calidad del aire	230
5.4.1.	Definición de aseguramiento de calidad	230
5.4.2.	Elementos de aseguramiento de calidad	230
5.5.	Índices de calidad del aire	237



CAPÍTULO 6
MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS

6.1.	Usos de la modelación	239
6.2.	Sistema de transportación sostenible	241
6.3.	Dispersión atmosférica	241
6.4.	Componentes básicos del modelado de calidad del aire	242
6.5.	Escala espacial de modelación	243
6.5.1.	Microescala	243
6.5.2.	Meso escala	244
6.5.3.	Macro escala	244
6.6.	Tipos de modelos	245
6.6.1.	Gaussianos	247
6.6.2.	Numéricos	247
6.6.3.	Estadísticos	248
6.6.4.	De caja	248
6.6.5.	Físicos	249
6.6.6.	Modelos Eulerianos	249
6.6.7.	Modelos de Langrange	250
6.6.8.	Modelos de receptor	250
6.6.9.	Modelos semiempíricos	250
6.7.	Ventajas del modelamiento	251
6.8.	Metodología de modelación	251
6.8.1.	Modelo Screening	251
6.8.2.	Modelos refinados	252
6.8.3.	Precisión de la modelación	253
6.8.4.	Sistema de modelado AERMOD	254



CAPÍTULO 7 FUENTES MÓVILES

7.1.	Normas Internacionales	258
7.1.1.	Normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO)	258
7.2.	Normas técnicas ecuatorianas	261
7.3.	Prueba de emisiones en la Revisión Técnica Vehicular (RTV) de acuerdo con normativa ecuatoriana	262
7.4.	¿Cómo se originan las emisiones del escape de motores?	265
7.5.	Equipos de control de emisiones vehiculares	266
7.5.1.	Convertidor catalítico	266
7.5.2.	Sistema cerrado de ventilación positiva del cárter	267
7.5.3.	Sistema de control de emisiones evaporativas	268
7.5.4.	Sistema de recirculación de gases de escape	268
7.6.	Combustibles opcionales como un mecanismo de control de emisiones	268

CAPÍTULO 8 CONTROL DE EMISIONES

8.1.	Ventilación	270
8.2.	Control de material particulado	271
8.2.1.	Cámaras de asentamiento	271
8.2.2.	Separadores por inercia	272
8.2.3.	Ciclones	272
8.2.4.	Colectores húmedos	275
8.2.4.1.	Lavador de gases tipo convencional	275
8.2.4.2.	Lavadores de lecho compacto	275
8.2.4.3.	Lavador de gases tipo Venturi	276
8.2.5.	Separadores por colisionador	276
8.2.6.	Filtros de tela o mangas	276
8.2.7.	Precipitadores electrostáticos	279
8.3.	Control de emisión de gases	280
8.3.1.	Absorción para gases tóxicos	280
8.3.2.	Adsorción para gases tóxicos	280
8.3.3.	Incineración de emisiones gaseosas	281



8.3.4. Sistemas de oxidación catalítica	282
8.3.5. Biofiltración de compuestos gaseosos	282
8.3.6. Condensación de emisiones gaseosas	282
Glosario	284
Bibliografía	300

El ambiente es uno de los aspectos más importantes en la vida de las personas, ya que es el lugar donde vivimos y nos desarrollamos. Sin embargo, a medida que el mundo se ha desarrollado y ha crecido, también ha aumentado la contaminación ambiental. Uno de los problemas ambientales más graves es la contaminación del aire. La contaminación del aire puede tener efectos graves en la salud humana y en el ambiente. En este libro se discutirá sobre la contaminación atmosférica, que es una de las principales preocupaciones ambientales en el mundo.

En el capítulo 1, se analizará los diferentes tipos de contaminantes del aire, las fuentes de contaminación del aire y los efectos de estos contaminantes en la salud humana y en el ambiente. También se discutirán los efectos globales de la contaminación del aire y los principales contaminantes presente en este.

En el capítulo 2, se analizará la meteorología de la contaminación atmosférica y se describirán los diferentes aspectos de la estructura dinámica de la atmósfera.

En el capítulo 3, se analizará el monitoreo de la contaminación del aire y se describirán los diferentes métodos de análisis de la contaminación atmosférica, así como los diferentes tipos de monitoreo de contaminación atmosférica. También se discutirán los diferentes equipos de muestreo de emisiones y los diferentes métodos de referencia de muestreo.

En el capítulo 4, se analiza la normativa regional en materia de control de la contaminación atmosférica en países como Colombia, Perú y Bolivia. Además, se examina en profundidad la normativa ecuatoriana sobre emisiones al aire desde fuentes fijas, destacando el rol clave que estas fuentes juegan en la emisión de



contaminantes. También, se discuten los límites máximos permisibles establecidos en la legislación, los cuales tienen como objetivo controlar y minimizar las emisiones de contaminantes al aire, garantizando el cumplimiento de los estándares de calidad del aire ambiente.

En el capítulo 5, se analizará la gestión de la calidad del aire y se describirán los diferentes instrumentos su gestión, así como la implementación de un sistema de gestión de calidad del aire. También se discutirá la estimación de emisiones y los diferentes sistemas QA/QC para la calidad del aire.

En el capítulo 6, se analizará la modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos y se describirán los diferentes tipos de modelos, así como la metodología de modelación.

En el capítulo 7, se analizarán las fuentes móviles de contaminación del aire y se describirán las normas internacionales y nacionales aplicadas a las emisiones de los vehículos. También se discutirán los diferentes equipos de control de emisiones vehiculares y los combustibles opcionales como un mecanismo de control de emisiones.

En el capítulo 8, se analizarán el control de emisiones y se describirán las diferentes técnicas y medidas utilizadas para controlar las emisiones de contaminantes al aire, como la ventilación, el control de material particulado y el control de emisiones de gases.

En resumen, este libro es una guía sobre la contaminación atmosférica y su impacto en el ambiente y la salud humana. A través de la exploración de los diferentes aspectos de la contaminación del aire, se espera que el lector tenga una comprensión más profunda del problema y las posibles soluciones para abordarlo.



CAPÍTULO 1

Contaminación
atmosférica

CAPÍTULO 1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En la literatura mundial existen un gran número de definiciones técnicas sobre la calidad del aire, sin embargo, se presenta a continuación una explicación sencilla: La calidad del aire se refiere a las concentraciones de sólidos, líquidos o gases presentes en la atmósfera que son nocivos para materiales, animales, vegetales o personas y que pueden interferir o no con el disfrute del ambiente.

El capítulo se enfoca en la contaminación atmosférica. En primer lugar, se discuten los diferentes tipos de contaminantes del aire, incluyendo los contaminantes primarios y secundarios. Se describen las diferentes fuentes de contaminación del aire, incluyendo las fuentes naturales y las fuentes antropogénicas. Se discuten los efectos de los contaminantes del aire, tanto los efectos locales como los efectos regionales y globales, como el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono. Se detallan los principales contaminantes del aire, incluyendo los contaminantes criterio y otros contaminantes de interés, así como los contaminantes peligrosos del aire. Además, se discute la química atmosférica, incluyendo la formación de contaminantes secundarios y la formación de la lluvia ácida. Finalmente, se proporcionan definiciones básicas de gases, incluyendo la expresión de la temperatura y la presión de los gases, las leyes de Boyle y Charles, la ley de los gases ideales y el cálculo de la masa molar aparente de las mezclas de gases.



1.1. Tipos de contaminantes del aire

La importancia de los contaminantes del aire no se determina por la cantidad total de emisión en la atmósfera, sino en función de su incidencia en la salud humana, animal y vegetal, así como en los materiales y el ambiente en general. Los contaminantes atmosféricos se clasifican en dos grandes grupos: contaminantes primarios y contaminantes secundarios.

a) Contaminantes primarios

Los contaminantes primarios son emitidos directamente a la atmósfera por la fuente, pudiendo ser un componente natural del aire, donde su concentración normal se encuentra excedida. Existen diferentes clases de contaminantes primarios, tales como:

- Compuestos que contiene azufre: dióxido de azufre (SO_2), ácido sulfhídrico (H_2S).
- Compuestos orgánicos tal como: hidrocarburos alifáticos, que contienen solo átomos de carbono e hidrógeno en su estructura y se clasifican en alcanos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), alquenos (C_nH_{2n}) y alquinos ($\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$). Incluyendo al metano (CH_4), etano (C_2H_6), propeno (C_3H_6) y butino (C_4H_8). Otros, constituyen los hidrocarburos aromáticos, que contienen anillos de benceno en su estructura molecular, y se clasifican como compuestos monocíclicos (un solo anillo) o policíclicos (varios anillos). Incluyen al benceno (C_6H_6), naftaleno (C_{10}H_8) y antraceno ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$). Por último, tenemos a los compuestos orgánicos volátiles (COV) que tienen una alta presión de vapor y se evaporan fácilmente a temperatura ambiente. Dentro de esta familia se incluyen el etileno (C_2H_4), el metanol (CH_3OH) y el formaldehído (CH_2O).
- Compuestos que contienen nitrógeno: monóxido de nitrógeno (NO) y amoniaco (NH_3).



- Halógenos: ácido clorhídrico (HCl) y ácido fluorhídrico (HF).
- Óxidos de carbono en altas concentraciones o volúmenes: monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂).

b) Contaminantes secundarios

Los contaminantes secundarios se encuentran constituidos por sustancias químicamente nocivas; formándose en la atmósfera a través de reacciones entre los contaminantes primarios y especies químicas que se encuentran en esta. Estos pueden ser: trióxido de azufre (SO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄), cetonas, aldehídos, ácidos inorgánicos, entre otros.

1.2. Fuentes de contaminación del aire

Entre las fuentes de contaminación del aire tenemos a las fuentes naturales y antropogénicas.

1.2.1. Fuentes naturales

Importantes cantidades de contaminantes del aire son producidos por procesos naturales, tales como: erupciones volcánicas, incendios forestales, descomposición vegetal, etc. Estos procesos se auto regulan mediante procesos de precipitación, oxidación, fotosíntesis, absorción, entre otros.

Las emisiones naturales que provienen principalmente de la vegetación, suelos e incendios forestales, son denominadas emisiones biogénicas. De acuerdo con los inventarios de emisiones, las producidas por la vegetación contribuyen con las dos terceras partes de las emisiones globales de compuestos orgánicos volátiles, excediendo incluso al aporte de las emisiones antropogénicas. Cada especie de planta posee en su estructura molecular más de 40.000 compuestos orgánicos volátiles



encontrados en sus células, con una variación que se encuentra en un intervalo de cientos a miles en cada especie. Entre los compuestos orgánicos que se producen por esta vía, podemos mencionar principalmente los compuestos orgánicos volátiles: isopreno y monoterpenos. Se ha calculado que las emisiones globales de isopreno de origen vegetal alcanzan más de 500 Tg (5×10^{12} g) cada año (Comisión Europea, 2023).

1.2.2. Fuentes antropogénicas

Este tipo de fuentes se concentran en los entornos urbanos y en áreas industriales, pueden ser clasificadas en dos grupos para un estudio más pormenorizado de las mismas: emisiones producidas por la actividad humana y emisiones producidas por la actividad industrial.

a) Emisiones producidas por la actividad humana

Son encontradas en los procesos de producción de calor y energía como, por ejemplo, la quema inducida de diferentes materiales al aire libre y como principal fuente, los vehículos de transporte de motor de combustión interna, sea que utilicen gasolina o diésel. Estas fuentes son las de mayor interés, debido a que, generalmente pueden ser controladas por procesos físicos o químicos.

b) Emisiones producidas por actividad industrial

Las emisiones producidas por la actividad industrial representan un desafío en cuanto al control, debido a la gran diversidad de características de las industrias, lo que hace que las emisiones sean muy dispares. Estas emisiones pueden incluir polvo inorgánico y químicamente inerte de la industria minera o cementera, así como una gran variedad de compuestos orgánicos y biológicamente significativos que se producen en numerosas industrias, generalmente por procesos de combustión.



1.3. Efectos de los contaminantes del aire

Los efectos de los contaminantes del aire se pueden clasificar en tres categorías principales según su alcance: locales, regionales y globales.

1.3.1. Efectos locales

La afectación de estos se produce directamente sobre los centros poblados que se encuentran contiguos a las fuentes contaminantes, con seis respuestas biológicas a la exposición de los contaminantes:

- 1) Fijación del contaminante en los tejidos sin asociarse con otros cambios biológicos.
- 2) Cambios fisiológicos de significancia incierta.
- 3) Cambios metabólicos bien definidos conformando la denominada enfermedad centinela.
- 4) Morbilidad, dada por el número proporcional de personas que enferman en población y tiempo determinados.
- 5) Mortalidad en casos extremos.
- 6) Reducción en la producción agrícola.

1.3.2. Efectos regionales

Los daños provocados en una región puntual altamente contaminante, tiende a afectar a regiones aledañas, provocan efectos adversos como la lluvia ácida.

La *lluvia ácida* es un fenómeno regional que se produce cuando la disolución de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico en el agua de lluvia provoca la formación de ácido carbónico (H_2CO_3), lo que disminuye el pH de las gotas de agua. Los efectos adversos de la lluvia ácida incluyen la destrucción de la vida acuática, la pérdida de



la producción en cosechas y bosques, la corrosión excesiva de materiales y afecciones cutáneas en humanos y animales.

Además del dióxido de carbono (CO_2), también contribuyen a la formación de la lluvia ácida las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Una vez que la lluvia ácida se ha producido, no existe forma de alterarla, por lo que la única solución viable es el control de las emisiones que la provocan en la fuente.

La lluvia ácida es un problema regional serio, las emisiones de un país en particular pueden afectar a otro a través del transporte de estas emisiones por el viento. Por esta razón, se debe realizar un control serio en cada región para abordar este problema en toda su magnitud.

1.4. Efectos globales

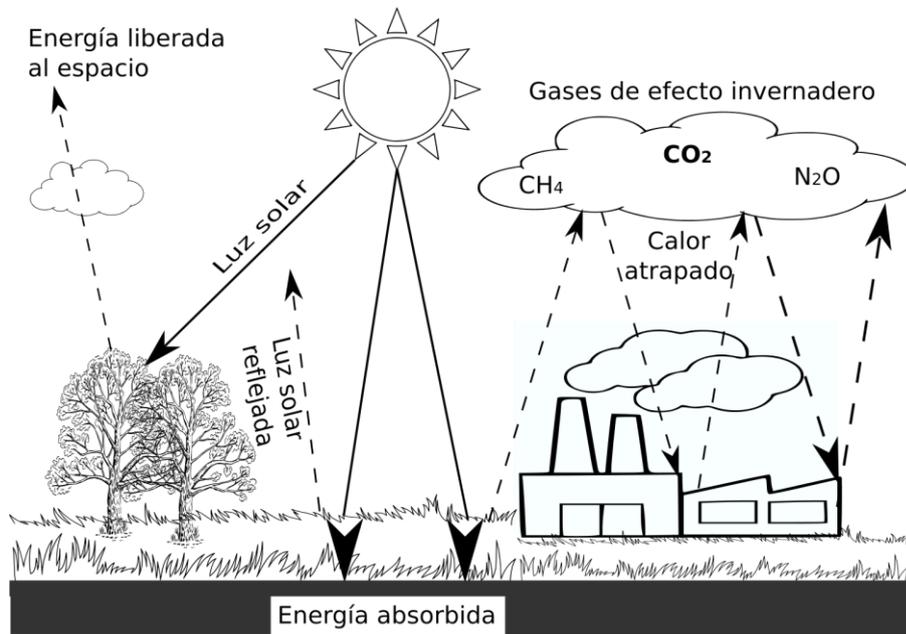
Los efectos inmediatos, a corto y largo plazo de la contaminación atmosférica son causados por determinados países y afectan a todo el planeta Tierra. Entre estos efectos se encuentran el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono.

a) Efecto invernadero

La evidencia científica ha demostrado que la temperatura global ha aumentado en un promedio de $0,4\text{ }^\circ\text{C}$ en los últimos 10 años. Además, se ha observado un aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, de 296 ppm a 318 ppm, lo que demuestra la relación directa entre estos dos fenómenos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018). Esto se debe a que el dióxido de carbono limita la salida del calor de la Tierra hacia el espacio, lo que permite el aumento de la temperatura global. Este proceso es similar al utilizado en los invernaderos, de ahí su nombre.



Figura 1-1
Efecto invernadero



Los problemas derivados del aumento de la temperatura global también pueden provocar cambios en los sistemas de lluvia, cambios en las corrientes marinas, huracanes, olas de calor, sequías, inundaciones, nubosidad y precipitaciones. Se espera que el aumento de la temperatura provoque el derretimiento de los casquetes polares y en consecuencia una elevación del nivel del mar de hasta de un metro en los próximos 100 años, lo que podría causar la inundación de ciudades costeras en todo el mundo.

b) Destrucción de la capa de ozono

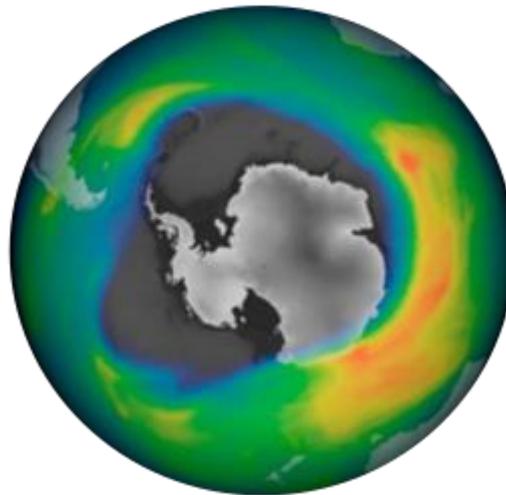
La destrucción de la capa de ozono es un problema que preocupa a la comunidad científica mundial debido al aumento de la exposición a las radiaciones ultravioletas. Esta exposición ha provocado un incremento en los casos de cáncer de piel, cataratas, degradación de plásticos y posibles daños a la cosecha de alimentos.

La causa de la destrucción de esta capa es la liberación de átomos de cloro de las moléculas de clorofluorocarbonos (CFC), también conocidos como freones, que



son utilizados en refrigeración, aires acondicionados, aerosoles, como solventes y agentes de soplado de plástico espumoso (Ozono secretariat - UN environment programme , 2023).

Figura 1-2
Destrucción de la capa de ozono



*Nota.*Destrucción de la capa de ozono. Recuperado de (Earth Observation Center, 2020)

El proceso de destrucción de la capa de ozono implica la combinación del átomo de cloro con una molécula de ozono, lo que provoca su destrucción. Este proceso es altamente reactivo y puede destruir hasta 100.000 moléculas de ozono por cada átomo de cloro. Finalmente, el átomo de cloro se neutraliza al combinarse con alguna otra sustancia química, deteniendo el proceso de destrucción (Ozono secretariat - UN environment programme , 2023).

1.5. Principales contaminantes del aire

Los contaminantes peligrosos del aire son sustancias producidas por actividades comerciales o industriales que representan un peligro potencial y real para la salud humana, causan cáncer, afectan la reproducción, provocan mutaciones congénitas,

desórdenes neurológicos y otros efectos en la salud. Estos contaminantes se evalúan en función de su toxicidad, persistencia en el ambiente o tendencia a la bioacumulación.

1.5.1. Contaminantes criterio

Los contaminantes de criterio son aquellos contaminantes que están regulados por las normas ambientales del aire de un país determinado. La lista de contaminantes de criterio varía de un país a otro, dependiendo de sus regulaciones técnico-legales. Sin embargo, en la mayoría de las regulaciones se incluyen los siguientes contaminantes: monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y material particulado (MP o PM, por sus siglas en inglés).

En cuanto al material particulado, algunas legislaciones especifican diferentes diámetros de partículas, como el PM₁₀ y PM_{2,5}, que corresponden a partículas de 10 y 2,5 µm de diámetro, respectivamente. También se incluyen mediciones de la concentración de metales pesados, principalmente el plomo.

a) Material particulado

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA), el material particulado se define en el método federal 40 CFR 53 como cualquier material sólido o líquido finamente dividido que no está combinado con el agua. Este puede presentarse de varias formas, tamaños y propiedades, desde pequeñas gotas de líquido hasta partículas microscópicas de polvo.

Las fuentes de material particulado son muy variadas, y pueden incluir hornos, trituradores, molinos, afiladores, estufas, calcinadores, calderas, incineradores, cintas



transportadoras, procesos de acabado textil, mezcladores y tolvas, cubilote, equipo procesador, cabinas de aspersión, digestores, incendios forestales, entre otros.

Los efectos del material particulado se centran en el sistema respiratorio, empeorando afecciones respiratorias y enfermedades cardiovasculares preexistentes, y pueden causar daños en el tejido pulmonar, carcinogénesis y mortalidad prematura. Las partículas de material particulado dependen del tipo de fuente, ya sea industrial o natural. La magnitud de las partículas determinará el tipo de equipo de muestreo necesario para su control. La literatura técnica menciona la existencia de partículas desde micrómetros hasta varios centímetros.

La contaminación por partículas, especialmente aquellas denominadas $PM_{2,5}$, representan un riesgo significativo para la salud y el medio ambiente. Estas partículas microscópicas pueden afectar negativamente la calidad del aire, la salud humana y causar daños a diversos ecosistemas.

En cuanto a la salud humana, las partículas de tamaño inferior a 10 micrómetros son las más preocupantes, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones e incluso llegar al torrente sanguíneo. La exposición a estas partículas puede provocar una serie de problemas respiratorios y cardiovasculares. Los grupos más vulnerables a los efectos de la contaminación por partículas son las personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, los niños y los adultos mayores (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

Los efectos ambientales de la contaminación por partículas son diversos y amplios. La reducción de la visibilidad, especialmente en áreas naturales protegidas, es causada principalmente por las partículas finas ($PM_{2,5}$). Además, las partículas pueden ser transportadas por el viento a grandes distancias y depositarse en diferentes ecosistemas, causando alteraciones en el equilibrio químico y nutricional de ríos, lagos y suelos. Estos cambios pueden resultar en la acidificación de cuerpos de agua,



la disminución de nutrientes en el suelo y daños a los ecosistemas y a la biodiversidad (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

Las partículas también pueden causar daños a estructuras y objetos culturales, como estatuas y monumentos. La lluvia ácida, agravada por la presencia de partículas contaminantes, puede erosionar y manchar la piedra y otros materiales, lo que a su vez afecta la preservación del patrimonio cultural (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

b) Monóxido de carbono

La combustión incompleta de los combustibles provoca que el carbono de su composición reaccione con el oxígeno del aire en condiciones que producen monóxido de carbono como producto. Este gas no tiene color ni olor y es más ligero que el aire. Las principales fuentes de monóxido de carbono son aquellas en las que se utilizan combustibles, especialmente la gasolina. Estas fuentes pueden ser estacionarias o móviles, dependiendo de si se encuentran en un lugar fijo o si se mueven. El monóxido de carbono también se produce en menor cantidad en fuentes domésticas, gases volcánicos, gases emanados de pantanos, minas de carbón, tormentas eléctricas, foto disociación del dióxido de carbono en la atmósfera superior, incendios, metabolismo de plantas y animales acuáticos y terrestres, incendios forestales, entre otros (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

La combustión incompleta de materiales combustibles como el gas, gasolina, queroseno, carbón, petróleo o madera produce el monóxido de carbono. Además, equipos como chimeneas, calderas, calentadores de agua y aparatos domésticos que utilizan combustibles fósiles o derivados del petróleo pueden producir monóxido de carbono cuando su funcionamiento es defectuoso.



Cuando se respira aire con alta concentración de CO, la cantidad de oxígeno que puede ser transportado en el torrente sanguíneo hacia órganos vitales como el corazón y el cerebro se reduce. Esto se debe a que el CO se une con la hemoglobina en la sangre más fácilmente que el oxígeno, formando carboxihemoglobina, lo que disminuye la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. A niveles muy altos de CO, que son posibles en interiores o en otros ambientes cerrados, este gas puede causar mareos, confusión, pérdida de conciencia y, en casos extremos, la muerte. La exposición prolongada a niveles más bajos de CO también puede tener efectos perjudiciales en la salud, como dolores de cabeza, debilidad y fatiga (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

Aunque los niveles muy altos de CO no son comunes en exteriores, cuando se presentan niveles elevados al aire libre, pueden ser especialmente preocupantes para las personas con ciertos tipos de enfermedades cardíacas. Estas personas ya tienen una capacidad reducida para obtener sangre oxigenada en sus corazones en situaciones donde el corazón necesita más oxígeno de lo habitual. Las personas con enfermedades cardíacas son especialmente vulnerables a los efectos del CO cuando hacen ejercicio o están bajo estrés. En estas situaciones, la exposición a corto plazo a niveles elevados de CO puede resultar en una disminución del suministro de oxígeno al corazón, acompañada de dolor en el pecho, también conocido como angina (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

c) Óxidos de nitrógeno

Dentro de este grupo de compuestos se pueden identificar siete óxidos de nitrógeno, a saber: monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de di nitrógeno (N₂O), trióxido de di nitrógeno (N₂O₃), tetróxido de di nitrógeno (N₂O₄) y pentóxido de di nitrógeno (N₂O₅). Sin embargo, a nivel de contaminantes del aire se encuentran principalmente el monóxido de nitrógeno (NO)



y el dióxido de nitrógeno (NO_2), ambos gases incoloros (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

El principal origen de los óxidos de nitrógeno es el nitrógeno del aire que participa en procesos de combustión a temperaturas elevadas. Otras fuentes de este contaminante son las plantas de ácido nítrico, así como las centrales eléctricas y las calderas industriales que utilizan carbón y aceites pesados. Los óxidos de nitrógeno se degradan rápidamente en la atmósfera al reaccionar con sustancias comúnmente presentes en el aire. Estos compuestos forman la lluvia ácida al reaccionar el dióxido de nitrógeno con sustancias químicas en presencia de luz solar. Además, el dióxido de nitrógeno (NO_2) también reacciona con la luz solar para formar ozono y smog fotoquímico en el aire que respiramos. Es importante tener en cuenta que el ozono es un oxidante fuerte y puede ser perjudicial para los seres vivos y los materiales en general (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

La formación de la mayoría de los óxidos de nitrógeno se debe a la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión a temperaturas elevadas, en la que el oxígeno y el nitrógeno del aire reaccionan para formar monóxido de nitrógeno (NO) que luego se oxida a dióxido de nitrógeno (NO_2). La mayor parte de los óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos a la atmósfera se encuentran en forma de monóxido de nitrógeno (NO) (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

El NO_2 y otros NO_x interactúan con el agua, el oxígeno y otros químicos en la atmósfera para formar lluvia ácida. La lluvia ácida daña ecosistemas sensibles como lagos y bosques, afectando la flora, la fauna y la calidad del agua. Las partículas de nitrato que se originan a partir de los NO_x hacen que el aire se vuelva brumoso y difícil de ver. Esto afecta a numerosos parques nacionales que son visitados por sus paisajes y vistas panorámicas, disminuyendo la calidad de la experiencia para los visitantes (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).



Los NO_x en la atmósfera contribuyen a la contaminación por nutrientes en aguas costeras. El exceso de nutrientes en estas áreas puede causar la proliferación de algas y la eutrofización, lo que lleva a la disminución del oxígeno disuelto en el agua y la muerte de organismos acuáticos (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

La inhalación de aire con altas concentraciones de NO_2 puede irritar las vías respiratorias humanas. La exposición a corto plazo a este contaminante puede agravar enfermedades respiratorias, especialmente el asma, provocando síntomas como tos, sibilancias y dificultad para respirar. Esta situación puede llevar a ingresos hospitalarios y visitas a salas de emergencias (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

Exposiciones más prolongadas a concentraciones elevadas de NO_2 pueden contribuir al desarrollo del asma y aumentar la susceptibilidad a infecciones respiratorias. Las personas con asma, los niños y los ancianos son generalmente más vulnerables a los efectos nocivos del NO_2 en la salud (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

d) Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre (SO_x) son un grupo de compuestos químicos que contienen azufre y oxígeno. Entre ellos, el dióxido de azufre (SO_2) es el más predominante. Este gas es tóxico y corrosivo, y se produce principalmente como resultado de la combustión de compuestos que contienen azufre. Las fuentes comunes de dióxido de azufre (SO_2) incluyen procesos industriales que utilizan calderas, el refinado de petróleo, la combustión interna en vehículos y los procesos de calefacción en edificios residenciales o comerciales (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).



Se puede manifestar que el dióxido de azufre (SO_2) se produce principalmente a partir de la combustión de sustancias que contienen azufre-carbón, así como en procesos industriales y en la producción de acero. El olfato humano puede detectarlo en concentraciones de hasta 3 ppm (0,0003%) a 5 ppm (0,0005%). En concentraciones de 1 a 10 ppm, se observa un aumento en la frecuencia respiratoria y pulso en los seres humanos (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

La exposición a corto plazo al dióxido de azufre puede dañar el sistema respiratorio humano y dificultar la respiración. El SO_2 es un irritante de las vías respiratorias, que al ser inhalado puede provocar inflamación y estrechamiento de las vías respiratorias, lo que lleva a síntomas como tos, sibilancias, falta de aliento y opresión en el pecho. Estos síntomas pueden ser particularmente graves en personas con enfermedades respiratorias preexistentes, como el asma, la bronquitis crónica y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

El SO_2 y otros óxidos de azufre, en altas concentraciones, pueden ser perjudiciales para árboles y plantas. El daño a su follaje puede disminuir su capacidad para realizar la fotosíntesis, lo que a su vez afecta su crecimiento y reproducción. La disminución del crecimiento en las plantas también puede tener efectos negativos en los ecosistemas circundantes y en la vida silvestre que depende de ellas para su alimento y refugio (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

Los óxidos de azufre (SO_x) también contribuyen a la formación de lluvia ácida, que resulta de la combinación de estos compuestos con vapor de agua en la atmósfera. La lluvia ácida puede tener efectos perjudiciales en ecosistemas sensibles, como los bosques, ríos y lagos, al alterar la química del suelo y del agua. Esto puede resultar en la muerte de organismos sensibles al pH, como algunas especies de peces y anfibios, y puede dificultar el crecimiento de ciertos tipos de vegetación (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).



Los óxidos de azufre pueden reaccionar con otros compuestos en la atmósfera para formar partículas finas que reducen la visibilidad, creando una neblina. Esta reducción en la visibilidad afecta a muchas áreas, especialmente reportadas en los Estados Unidos, incluyendo parques nacionales y áreas silvestres protegidas. Además de disminuir la calidad estética de estos espacios naturales, la neblina puede afectar negativamente la salud humana, especialmente en personas con afecciones respiratorias (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

La deposición de partículas finas en la atmósfera también puede manchar y dañar piedra y otros materiales utilizados en la construcción de monumentos y estatuas. Esto puede tener un impacto negativo en objetos culturales y estructuras históricas, deteriorando su apariencia y acelerando su descomposición (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

e) **Ozono**

El ozono (O_3) es un compuesto químico que se presenta como un gas azulado con un olor metálico y picante, que se encuentra en diferentes partes de la atmósfera. El ozono en la estratosfera (la capa superior de la atmósfera) nos protege de los rayos ultravioleta del Sol. El ozono en la troposfera (la capa inferior de la atmósfera) se clasifica como un contaminante secundario, que se forma a partir de la reacción química compleja entre el dióxido de nitrógeno (NO_2) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) que en presencia de luz solar. Este ozono conocido como ozono troposférico o smog fotoquímico es dañino para la salud y el ambiente. En las zonas rurales limpias, se observan niveles de ozono en la tropósfera de 20 a 80 ppb. En las zonas urbanas contaminadas, las concentraciones de ozono pueden alcanzar hasta 500 ppb.

El ozono produce efectos nocivos en los seres humanos, como la sensibilización de las vías respiratorias, tos, dolor de cabeza, aumento de la frecuencia



respiratoria, disminución de la resistencia de las vías respiratorias y disminución de la función pulmonar. También puede afectar a materiales como el caucho sintético, reduciendo su vida útil, y puede decolorar tejidos de fibra natural como la celulosa.

f) Plomo

El plomo es un metal pesado cuya fuente puede ser la combustión de pinturas basadas en él, tuberías que lo contienen, así como acumuladores almacenados. Los efectos del plomo sobre la salud humana son el ataque al sistema nervioso central con daño neurológico consecuente, este metal no se elimina fácilmente del cuerpo.

Podríamos decir que los metales pesados como el plomo, el cadmio y el mercurio son contaminantes atmosféricos significativos. El plomo es un metal gris-azulado dúctil con un punto de fusión de 327,5 °C y de ebullición de 1.740 °C. Este metal se utilizaba en forma de tetraetilo de plomo como aditivo en los combustibles, para mejorar el octanaje. En ciertos lugares, la minería y fundición son fuentes de emisión, así como la refundición del plomo y el refinado y fabricación de compuestos que contienen plomo. Además, los incineradores de residuos también causan emisiones de plomo. En el aire, las emisiones de plomo se encuentran en forma de partículas inferiores a 3 µm. También se encuentra presente en algunos alimentos y en el agua. Un elevado nivel de plomo en la sangre puede causar problemas hematológicos.

g) Hidrocarburos - Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)

Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) son aquellos que contienen carbono en su composición, excluyendo al monóxido de carbono, ácido carbónico, carburos y carbonatos metálicos, así como el carbonato de amonio y acetona. La evaporación es el principal proceso por el que estos contaminantes se incorporan a la atmósfera, y este proceso ocurre principalmente en fuentes como la producción,



refinación, almacenaje y transferencia de petróleo y sus derivados, así como en la fabricación de aceites vegetales, plásticos y sustancias orgánicas sintéticas.

Los COVs contribuyen en la formación de ozono y smog fotoquímico. Además, una gran cantidad de estos compuestos son carcinógenos y altamente tóxicos, como el benceno y el 1,3-butadieno, que tienen ambas propiedades.

Los hidrocarburos son una parte de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles que contienen únicamente carbono e hidrógeno en su estructura. Estos compuestos son habitualmente derivados del petróleo y se clasifican en alifáticos y aromáticos.

Los compuestos alifáticos se dividen en tres subgrupos: los alcanos, que son compuestos inertes; los alquenos, caracterizados por su alta reactividad; y los alquinos, que son medianamente reactivos.

Los compuestos aromáticos están relacionados con el anillo bencénico, que proviene del benceno, y son compuestos que no son muy reactivos.

Los compuestos aromáticos policíclicos (HAPs), por otro lado, son emitidos a la atmósfera en pequeñas cantidades, y son potencialmente carcinogénicos.

Las principales fuentes de generación de hidrocarburos a la atmósfera son las fuentes móviles (vehículos), así como los procesos de fabricación de productos químicos orgánicos, la refinación de crudo y la distribución de gas natural. En países como Estados Unidos, la producción de hidrocarburos está principalmente generada por fuentes estacionarias.

Dentro de los hidrocarburos más importantes y comunes se encuentra el metano, que es generado por animales, masas forestales, zonas pantanosas y



vehículos. Este contaminante es parte del grupo de los gases generadores de efecto invernadero.

h) Hidrocarburos que no son compuestos orgánicos volátiles

Dentro de este grupo se encuentran, a excepción de los compuestos orgánicos volátiles, todos los compuestos líquidos y gaseosos que contienen carbono e hidrógeno en su composición. Las principales fuentes de estos tipos de compuestos son la fabricación de espuma, el uso de disolventes para la limpieza y el desengrasado, así como los sistemas de aire acondicionado.

Los principales efectos de estos tipos de compuestos son la destrucción de la capa de ozono estratosférico, que es una protección contra la excesiva radiación ultravioleta que recibe la Tierra. En este grupo de compuestos se pueden encontrar, entre otros, freones (CFC, HCFC), tetracloruro de carbono, cloruro de metileno y metilo cloroformo.

1.5.2. Otros contaminantes de interés

En este apartado se describen brevemente algunos contaminantes, orgánicos o inorgánicos, que no se encuentran controlados por la mayoría de las legislaciones a nivel latinoamericano, pero que pueden ser de suma importancia debido a sus efectos sobre la salud o el ambiente.

1.5.2.1. Contaminantes orgánicos de no referencia

a) Acrilonitrilo

Este tipo de compuestos se presentan como un líquido volátil, inflamable, incoloro, soluble en agua. Son compuestos desarrollados por el hombre y empleados



en los procesos de fabricación de fibras acrílicas y resinas. En mucho de los casos su control es vital por ser carcinogénico.

b) Benceno

Es un líquido claro e incoloro, ligeramente soluble en el agua, es un constituyente del petróleo y sus derivados, con los efectos sobre la salud de ser carcinogénico.

c) Disulfuro de carbono

Este contaminante se presenta como un líquido volátil, inflamable e incoloro, es usado en la producción de rayón viscoso. Puede producir daños en la salud a nivel cerebral y causar atrofia muscular.

d) 1,2 dicloro etano

Se presenta como un líquido incoloro, inflamable, soluble en agua, es un compuesto desarrollado por el hombre y es usado en la síntesis de algunos químicos. Sus efectos sobre la salud es ser mutagénico, causar daños a pulmones, hígado y riñones.

e) Diclorometano

Este compuesto contaminante se presenta como un líquido claro, no inflamable, altamente volátil, es muy comúnmente utilizado como disolvente en pinturas. Sus efectos sobre la salud es ser carcinogénico.



f) Formaldehído

Este es un aldehído común, el cual es un gas a temperatura ambiente, siendo un producto intermedio en el ciclo del metano (CH₄). Los efectos asociados sobre la salud es ser carcinogénico.

g) Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Estos compuestos proceden de la combustión incompleta de los compuestos orgánicos y sus efectos sobre la salud es ser carcinogénico, entre los que podemos encontrar a los compuestos más comunes producto de la quema de combustibles fósiles al benzo(a)pireno, naftaleno, antraceno y fluoranteno.

h) Estirenos

Es un líquido volátil, incoloro, empleado en el proceso de fabricación de polímeros y los efectos sobre la salud es ser mutagénico.

i) Tolueno

Este compuesto proveniente del refinamiento del petróleo se presenta como un líquido volátil no corrosivo cuyos efectos sobre la salud es el de tener una elevada toxicidad.

j) Cloruro de vinilo

El cloruro de vinilo es un gas incoloro procedente de la producción del PVC y su efecto sobre la salud es el de ser carcinogénico.

1.5.2.2. Contaminantes inorgánicos de no referencia

El estudio de este tipo de contaminantes es importante debido a los efectos sobre la salud que provocan.



a) Arsénico

Este contaminante es abundante en la naturaleza en actividades volcánicas, se encuentra en estado metálico y no metálico, en procesos de producción se encuentran en la fundición de metales, pesticidas y la combustión de combustibles, es objeto de estudio y control debido a que es potencialmente carcinogénico.

b) Cadmio

Está considerado como un contaminante que tiene el potencial de producir cáncer. Este es un metal plateado blanquecino y dúctil, el mismo que, es un subproducto de la producción del zinc y del galvanizado de metales.

c) Mercurio

Tiene la propiedad de bioacumularse, provocando daños en el sistema nervioso central y en los riñones. Este contaminante se encuentra presente en la minería, plantas de cloro alcalino, preservantes de pintura, pilas, equipos médicos entre otros.

d) Níquel

Metal duro de color plateado, presente en la naturaleza en la corteza terrestre, principalmente utilizado en la producción de acero y tiene efecto sobre la salud al ser carcinogénico.

e) Radón

Este contaminante tiene la propiedad de poder provocar cáncer de pulmón. Este contaminante es un gas noble radioactivo, procedente de tierras y rocas, en aguas subterráneas y en el aire.



f) Vanadio

Este es un metal brillante empleado en metalurgia, así como, en la combustión del carbón y fueloil. Los efectos sobre la salud son la posibilidad de causar bronquitis y neumonía.

g) Ácido sulfhídrico

Es un gas incoloro, soluble en agua y alcohol, tóxico pudiendo provocar irritación ocular y de vías respiratorias. Presente en la depuración de aguas residuales, refinación del petróleo y curtido de pieles.

h) Manganeso

Metal tóxico, utilizado en metalurgia, en fertilizantes y en la industria del cristal.

1.6. Química atmosférica

En esta sección se describen las reacciones más usuales y prácticas, las cuales, suceden en la atmósfera, puesto que, el tema de la química ambiental es un tema muy extenso y complejo, que se debería dedicar una sola obra a dicho tema.

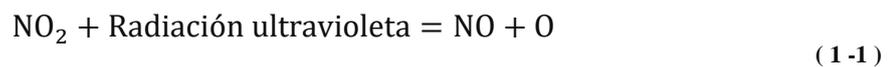
1.6.1. Formación de contaminantes secundarios

Los oxidantes fotoquímicos se forman mediante mecanismos complejos, los cuales se realizan por etapas de una serie de reacciones química, a continuación, se presenta un resumen de estos procesos:



- 1) Los hidrocarburos (HC) y monóxido de nitrógeno (NO) es producido intensamente en horas de la mañana.
- 2) El monóxido de nitrógeno (NO) sufre oxidación dando como resultado el dióxido de nitrógeno (NO₂) aumentando la concentración de este último en la atmósfera.
- 3) El dióxido de nitrógeno (NO₂) en su concentración superior en la atmósfera es irradiado por las radiaciones solares que se va haciendo más intensa, iniciando en marcha el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno (NO₂).

1. Formación de oxidantes a través del ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno (NO₂)



2. Formación de radicales libres activos, el ciclo fotolítico se desequilibra por la presencia en el aire de hidrocarburos al reaccionar con el oxígeno atómico y el ozono generado, formando radicales libre muy reactivos.

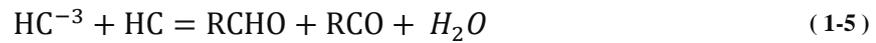


La presencia de luz solar en la atmósfera es un factor importante para que se produzca esta reacción, ya que es un proceso fotoquímico. El ozono y el hidrocarburo actúan como precursores en la formación del radical hidroxilo, que es un agente oxidante muy reactivo y capaz de oxidar muchos compuestos en la atmósfera.

3. Formación de productos finales, los radicales libres dan lugar a la formación de contaminantes fotoquímicos según las reacciones que se den entre estos con

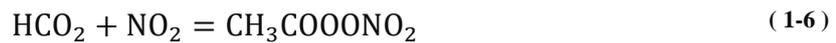


otros radicales libres, con contaminantes primarios o con los constituyentes normales del aire.



Donde RCHO representa aldehídos y RCO representa cetonas. La reacción se produce en presencia de luz solar y otros contaminantes atmosféricos, y puede contribuir a la formación de smog fotoquímico.

La reacción entre el hidropéroxido (HCO_2) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) puede producir nitratos de per-oxiacetileno o PAN ($\text{CH}_3\text{COOONO}_2$), que también son contaminantes fotoquímicos, según la siguiente reacción:



Así mismo, las reacciones dependerán de la radiación ultravioleta y las condiciones propias del día o la noche.

Durante el día, la ecuación general de la formación del ozono en la atmósfera es:



Esta ecuación representa la reacción química que tiene lugar en presencia de luz solar. Los NO_x y los COVs se oxidan en la atmósfera para producir ozono y otros compuestos.

Durante la noche, la ecuación general de la formación del ácido nítrico en la atmósfera es:



En esta reacción, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el ozono (O_3) reaccionan con el agua (H_2O) presente en la lluvia para formar ácido nítrico (HNO_3).

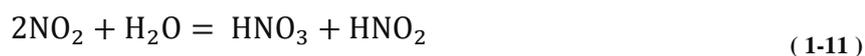


1.6.2. Formación de la lluvia ácida

La lluvia ácida se produce cuando el agua que se condensa en las nubes reacciona con las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) provenientes de fuentes industriales. Estas emisiones se acumulan en la atmósfera y se convierten en partículas de sulfato o nitrato, que luego reaccionan con el vapor de agua en el aire para formar ácido sulfúrico o ácido nítrico diluido. Estos ácidos se incorporan al ciclo de agua en forma de rocío, llovizna, niebla, nieve o lluvia.



(¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9)



1.7. Definiciones básicas de gases

Los gases son una de las formas más comunes de materia en nuestro universo y se pueden encontrar en muchos entornos diferentes, desde la atmósfera terrestre hasta el espacio exterior. Para comprender cómo funcionan los gases y cómo interactúan con su entorno, es esencial conocer algunas definiciones básicas. Esta sección de la obra se centrará en una serie de conceptos fundamentales relacionados con los gases, necesarios para gestionar adecuadamente la contaminación atmosférica.



1.7.1. Expresión de la temperatura de un gas

La expresión de la temperatura del gas se basa en las escalas Fahrenheit y Celsius. Mientras que la escala Fahrenheit tiene un rango de 180 unidades entre el punto de congelación y el de ebullición, la escala Celsius tiene un rango de 100 unidades. Por lo tanto, cada grado Celsius equivale a 1,8 grados Fahrenheit. Para convertir de una escala a otra, se pueden utilizar su relación mediante las ecuaciones (1-12) y (1-13).

$$^{\circ}\text{F} = 1,8 ^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-12)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{1,8} \quad (1-13)$$

La temperatura absoluta es el resultado de experimentos con gases perfectos que demuestran que, bajo presión constante, cada grado Celsius por debajo de 0 °C produce un cambio de 1/273,16 en el volumen del gas. Si este cambio en el volumen por grado de temperatura es constante, entonces el volumen del gas podría, teóricamente, llegar a ser cero, esta condición ocurre a 273,16 °C por debajo de 0 °C o a una temperatura de -273,16 °C en la escala Celsius.

Temperaturas absolutas medidas en unidades Fahrenheit se expresan en grados Rankine (°R), mientras que las medidas en unidades Celsius se expresan en grados Kelvin (°K). La ecuación (1-14) y (1-15) permiten convertir de una escala a otra.

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,67 \quad (1-14)$$

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16 \quad (1-15)$$



En este esquema, se utilizará el símbolo T para denotar la temperatura absoluta y t se utilizará para indicar grados Fahrenheit o Celsius.

1.7.2. Expresión de la presión de los gases

La presión es el esfuerzo compresivo en un fluido que se mide como fuerza por unidad de área. Los fluidos solo pueden resistir esfuerzos de corte y compresión y no pueden resistir el esfuerzo de tensión. La presión es igual en todas las direcciones en un punto dentro de un volumen de fluido y actúa perpendicularmente a una superficie. Se puede medir en diferentes unidades, como lb/in², psi, N/m² o Pa.

La presión barométrica y la presión atmosférica son sinónimos. Estas presiones se miden con un barómetro y normalmente se expresan en pulgadas o milímetros de mercurio (Hg). La presión barométrica estándar es la presión atmosférica media a nivel del mar, a 45° de latitud norte a 1,67 °C. Equivale a una presión de 14,696 psi ejercida en la base de una columna de mercurio de 29,92 pulgadas de altura. El tiempo y la altitud son los responsables de las variaciones de la presión barométrica.

Las mediciones de presión por medidores ordinarios son indicaciones de la diferencia de presión por encima o debajo de la del entorno atmosférico alrededor del medidor. La presión manométrica, entonces, es normalmente la presión del sistema.

Si es mayor que la presión en la atmósfera, la presión manométrica se expresa como un valor positivo; si es menor, la presión manométrica se expresa como negativa. El término vacío designa una presión manométrica negativa.

La abreviación g se usa para especificar una presión manométrica. Por ejemplo, psig significa presión manométrica en libras-fuerza por pulgada cuadrada.

Dado que la presión manométrica (que puede ser positiva o negativa) es la presión relativa a la presión atmosférica previa, la presión manométrica, sumada



algebraicamente a la presión atmosférica previa (que siempre es positiva), proporciona un valor que tiene un dato de cero absoluto de presión. Una presión calculada de esta manera se llama presión absoluta. La expresión matemática es:

$$P = P_b + p_g \quad (1-16)$$

Donde:

P = presión absoluta.

P_b = presión barométrica (atmosférica).

p_g = presión manométrica.

La abreviación a, a veces se usa para indicar que la presión es absoluta. Por ejemplo, psi significa presión absoluta en libras por pulgada cuadrada. El símbolo P por sí mismo también se usará en este libro para indicar presión absoluta. La presión absoluta permite la conversión de un sistema de presión a otro.

1.7.3. La Ley de Dalton de presión parcial

Cuando hay gases o vapores (sin interacción química) presentes en una mezcla en un espacio determinado, la presión ejercida por un componente de la mezcla de gases a una temperatura dada es la misma que ejercería si llenara el espacio completamente solo. La presión ejercida por un componente de una mezcla de gases se llama su presión parcial. La presión total de la mezcla de gases es la suma de las presiones parciales.

1.7.4. Las leyes de Boyle y Charles

La Ley de Boyle establece que, cuando la temperatura (T) se mantiene constante, el volumen (V) de una masa dada de un gas perfecto de una composición



dada varía inversamente a la presión absoluta, la que se representa mediante la ecuación (1-17).

$$V \propto \frac{1}{P} \text{ (a T constante)} \quad (1-17)$$

Donde:

α = proporcional a.

La Ley de Charles establece que, cuando el volumen se mantiene constante, la presión absoluta de una masa dada de un gas perfecto de una composición dada varía directamente con la temperatura absoluta, representada mediante la ecuación (1-18).

$$P \propto T \text{ (a V constante)} \quad (1-18)$$

1.7.5. La ley de los gases ideales

Tanto la Ley de Boyle como la de Charles se satisfacen en la siguiente ecuación:

$$PV = \frac{mRT}{M} \quad (1-19)$$

Donde:

P = presión absoluta.

V = volumen del gas.

m = masa de un gas.

M = masa molecular de un gas.

T = temperatura absoluta.

R = constante universal de los gases.



La unidad de R depende de las unidades de medida utilizadas en la ecuación. Algunos valores útiles son los presentados análisis dimensionales en las ecuaciones (1-20), (1-21), (1-22) y 1-23).

$$1544 \frac{(lb)(ft)}{(lb - mol)(^{\circ}R)} \quad (1-20)$$

$$21,83 \frac{(in Hg)(ft^3)}{(lb - mol)(^{\circ}R)} \quad (1-21)$$

$$554,6 \frac{(mm Hg)(ft^3)}{(lb - mol)(^{\circ}R)} \quad (1-22)$$

$$82,06 \frac{(cm^3)(atm)}{(gm - mol)(^{\circ}R)} \quad 1-23)$$

En las unidades de R anteriores:

$V =$ ft³, cm², para la ecuación (1-23)

$m =$ lb, g, para la ecuación (1-23)

$M =$ lb/lb-mole, g/g-mole, para la ecuación (1-23)

$T =$ °R, °K, para la ecuación (1-23)

$P =$ lb/ft², para la ecuación (1-20)

$P =$ in Hg, para la ecuación (1-21)

$P =$ mm Hg, para la ecuación (1-22)

$P =$ atm, para la ecuación (1-23)



Cualquier valor de R puede obtenerse utilizando el hecho, con los factores de conversión adecuados, de que hay 22,414 l por g-mole a 0 °C y 101,321 kPa.

1.7.6. Cálculo de la masa molecular aparente de las mezclas de gases

Utilizando la ley de Dalton de presión parcial y la ley de los gases ideales, se puede derivar la ecuación (1-24) para calcular la masa molecular aparente de una mezcla de gases.

$$M_{mix} = \sum B_x M_x \quad (1-24)$$

Donde:

M_{mix} = masa molecular aparente de una mezcla de gases.

B_x = proporción en volumen de un componente de gas.

M_x = masa molecular de un componente de gas.

1.7.7. Densidad del gas

La densidad de gas se puede determinar reordenando la ecuación de los gases ideales y dejando la densidad como $\rho = \frac{m}{v}$:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (1-25)$$

Donde:

ρ = densidad.

P = presión absoluta.



$M =$ masa molecular.

$T =$ temperatura absoluta.

$R =$ constante universal de los gases.

Un método para determinar la densidad a T_s (temperatura de la chimenea) y P_s (presión de la chimenea) es usar el hecho de que hay 22,414 l por gm-mole o 359 ft³ por lb-mole a 0 °C y 101,325 Pa, y usar la corrección de la ley de los gases ideales.

1.7.8. Viscosidad, origen y definición de la viscosidad

La viscosidad es el resultado de dos fenómenos: (a) fuerzas cohesivas entre moléculas y (b) transferencia de momentum entre capas fluyentes causadas por la agitación molecular perpendicular a la dirección del movimiento. Entre capas adyacentes de un fluido en movimiento, ocurre un esfuerzo de corte (T) que es directamente proporcional al gradiente de velocidad.

1.7.9. Viscosidad de líquidos

En un líquido, la transferencia de momentum entre capas con velocidad relativa es pequeña en comparación con las fuerzas cohesivas entre moléculas. Por lo tanto, el esfuerzo de corte es predominantemente el resultado de la cohesión entre moléculas. Dado que las fuerzas de cohesión disminuyen rápidamente con un aumento de la temperatura, el esfuerzo de corte disminuye con un aumento de la temperatura.

1.7.10. Viscosidad de los gases

En un gas, las moléculas están demasiado alejadas para que la cohesión entre moléculas sea efectiva. Por lo tanto, el esfuerzo de corte es predominantemente el resultado de un intercambio de momentum entre capas fluyentes causado por la



actividad molecular. Dado que la actividad molecular aumenta con el aumento de la temperatura, el esfuerzo de corte aumenta con el aumento de la temperatura. Por lo tanto, la viscosidad del gas aumenta con el aumento de la temperatura.

La viscosidad de un gas para condiciones previas se puede encontrar con precisión a partir de la ecuación (1-26).

$$\frac{\mu}{\mu^{\circ}} = \left(\frac{T}{273,2} \right)^n \quad (1-26)$$

Donde:

μ = viscosidad previa.

μ° = viscosidad a 0 °C y presión previa.

T = temperatura absoluta previa (°K).

n = un exponente empírico ($n = 0,768$ para el aire).

La viscosidad del aire y otros gases a varias temperaturas y a una presión de 1 atmósfera se puede encontrar en tablas de ingeniería.

1.7.11. Capacidad calorífica específica

La capacidad calorífica específica de un gas es la cantidad de calor requerida para cambiar la temperatura de una masa unitaria de gas en un grado de temperatura. Las unidades de capacidad calorífica específica son, por lo tanto, (BTU/lb) (°F) o (calorías/g) (°C), dependiendo del sistema dimensional utilizado.

El calor se puede agregar mientras que el volumen o la presión del gas permanecen constantes. Por lo tanto, puede haber dos valores de capacidad calorífica específica: (a) la capacidad calorífica específica a volumen constante (C_v), y (b) la capacidad calorífica específica a presión constante (C_p). Debido a que la energía



térmica agregada a presión constante se utiliza para aumentar la temperatura y realizar trabajo en contra de la presión a medida que se produce la expansión, C_p es mayor que C_v .

La capacidad calorífica específica para una mezcla de gases se puede calcular a partir de las ecuaciones (1-27) y (1-28).

$$C_{p(mix)} = \sum B_x C_{p(x)} \quad (1-27)$$

$$C_{v(mix)} = \sum B_x C_{v(x)} \quad (1-28)$$

Donde:

$C_{p(mix)}$ = capacidad calorífica específica a presión constante para la mezcla de gases.

$C_{v(mix)}$ = capacidad calorífica específica a volumen constante para la mezcla de gases.

B_x = proporción por volumen de un componente de gas.

$C_{p(x)}$ = capacidad calorífica específica a presión constante para un componente de gas.

$C_{v(x)}$ = capacidad calorífica específica a volumen constante para un componente de gas.

Para temperaturas ordinarias (por ejemplo, alrededor de 26,67 °C (80 °F) como se experimenta en el dispositivo de medición en trabajos de muestreo atmosférico o de origen), se puede suponer que las capacidades caloríficas específicas son constantes.

1.7.12. Número de Reynolds



Una fuerza inercial típica por unidad de volumen de fluido es $\frac{\rho v^2}{g_c L}$; una fuerza viscosa típica por unidad de volumen de fluido es $\mu \frac{v}{g_c L^2}$. La primera expresión dividida por la segunda proporciona la relación adimensional conocida como Número de Reynolds, presentada en la ecuación (1-29).

$$N_{Re} = \frac{L v \rho}{\mu} \quad (1-29)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido (masa/volumen).

v = velocidad del fluido.

g_c = constante dimensional.

L = una dimensión lineal.

μ = viscosidad del fluido.

N_{Re} = Número de Reynolds.

Cuanto mayor sea el Número de Reynolds, menor será el efecto de las fuerzas viscosas; cuanto menor sea el Número de Reynolds, mayor será el efecto de las fuerzas viscosas.

La dimensión lineal, L , es una longitud característica del sistema de flujo. Es igual a cuatro veces el radio hidráulico medio, que es el área transversal dividida por el perímetro humedecido. Por lo tanto, para una tubería circular:

L = diámetro de la tubería; para una partícula que se asienta en un medio fluido,

L = diámetro de la partícula; para un conducto rectangular,



$L =$ dos veces la longitud veces el ancho dividido por la suma; y para un anillo como un sistema rotámetro,

$L =$ diámetro exterior menos el diámetro interior.

1.7.13. Flujo laminar y turbulento

En el flujo laminar, el fluido se ve obligado a moverse en capas (o laminado) por la acción de la viscosidad. Las capas de fluido se mueven en trayectorias paralelas que se mantienen distintas entre sí; cualquier agitación es de naturaleza molecular únicamente. El flujo laminar ocurre cuando el Número de Reynolds para tuberías circulares es menor a 2.000 y menor a 0,1 para partículas que se asientan en un medio fluido.

En el flujo turbulento, el fluido no se limita a trayectorias paralelas, sino que se mueve de manera caótica hacia adelante. El flujo totalmente turbulento ocurre cuando el Número de Reynolds es mayor a 2.500 para tuberías circulares y mayor a 1.000 para partículas que se asientan.

1.7.14. Análisis dimensional y transformación de unidades

Antes de profundizar en las técnicas de toma de muestra, como se podrá observar en los siguientes capítulos de esta obra, es importante discutir los siguientes términos.

Las unidades utilizadas para expresar las concentraciones de los contaminantes que se emiten (masa/volumen), como se observa en la ecuación (1-30) en fase gaseosa, generalmente partes por millón en volumen (ppm (v)) y los miligramos por metro cúbico (mg/m^3). La primera unidad es independiente de la presión y la temperatura, mientras que la segunda depende de ellas. Generalmente, en emisiones,



las concentraciones se expresan a 0 °K y 1 atm, por lo que su unidad es mg/Nm³. Suponiendo que son gases ideales, existe una vinculación entre estas unidades.

$$ppm = \frac{22,4 \left(\frac{mg}{m^3} \right)}{M} \quad (1-30)$$

Con lo cual se puede vincular las dos unidades para cualquier contaminante gaseoso, mientras que, para la concentración del material particulado se expresan en mg/Nm³.

La unidad habitual para presentar los resultados del análisis de calidad del aire es las partes por millón (ppm) volumétrica. Algunos contaminantes también se expresan en microgramos por metro cúbico (µg/m³) y se utiliza la ley de gases ideales para realizar la conversión de unidades. Las partes por millón son iguales a la fracción molar (en volumen) del contaminante multiplicada por un millón (1'000.000), según la ecuación (1-31).

$$ppm = (\text{fracción molar del contaminante}) \times 1000000 \quad (1-31)$$

En otras palabras, una concentración de 1 ppm significa que, en un volumen de aire dado, hay una parte del contaminante por cada millón de partes de aire.

$$ppm = \frac{\text{Volumen del gas contaminante}}{\text{Volumen de la mezcla de gases} \times 10^6} \quad (1-32)$$

Con esto se puede expresar:

$$ppm = \frac{\text{Moles del gas contaminante}}{\text{Moles de la mezcla de gases} \times 10^8} \quad (1-33)$$

Al utilizar estas dos expresiones como partida se llega a la siguiente expresión para realizar la transformación respectiva de unidades:



$$\mu \frac{g}{m^3} = \frac{PM_{(g)}(ppm)}{0,02445388} \quad (1-34)$$

Esta última expresión es válida para gases bajo condiciones estándar, es decir, a 20 °C de temperatura y 1 atm de presión. Conocer el caudal de los contaminantes emitidos por los gases de chimenea (masa/tiempo) requiere de datos sobre la emisión, los datos físicos del conducto o chimenea, la concentración del contaminante en cuestión, la velocidad de los gases en el conducto (m/s) y la sección del ducto (m²). Con esta información, se puede calcular el caudal másico Q (mg/s), de acuerdo con la ecuación (1-35).

$$Q = vAC \quad (1-35)$$

Dónde:

v = velocidad (m/s).

A = área del conducto (m²).

C = concentración del contaminante (mg/m³).

La determinación del caudal másico permite abordar el problema del impacto atmosférico causado por las emisiones. Además, se puede realizar un inventario de emisiones mediante el cálculo, por ejemplo, del número de toneladas por año (t/año) de emisión de dióxido de carbono de una planta industrial específica, lo que proporciona una idea del aporte a la problemática del calentamiento global.

1.7.15. Muestreo de la fuente de material particulado

Los métodos de muestreo de la fuente se utilizan para asegurar que las emisiones cumplan con las regulaciones establecidas. El muestreo de la fuente proporciona información sobre la tasa de emisión de contaminantes. Estos datos también se utilizan para determinar la tecnología de control más efectiva disponible.



1.7.16. Muestreo isocinético de la fuente

La palabra “iso” hace referencia a la igualdad, similitud y uniformidad. Cinético se refiere al movimiento. El muestreo isocinético consiste en una muestra igual o uniforme de partículas y gases en movimiento en la chimenea.

Se logra el muestreo isocinético de la fuente cuando la velocidad del gas que entra en la boquilla de la sonda de muestreo es igual a la velocidad del flujo de gas que se acerca. Esto proporciona una muestra uniforme e imparcial de los contaminantes emitidos por la fuente.

El muestreo isocinético de la fuente evalúa y define de manera más precisa los diversos parámetros en la chimenea tal como existen en el momento de la muestra.

1.7.17. Contenido de humedad de un gas de chimenea

La cantidad de vapor de agua presente en un gas de chimenea se puede determinar mediante el cálculo del porcentaje de vapor de agua en base al volumen. Este dato es importante para poder calcular el peso molecular aparente del gas de chimenea, lo cual es necesario para aplicar la ley de los gases ideales. Esta ley establece la relación entre la presión, el volumen, la temperatura y la masa de un gas "perfecto".

1.7.18. Fracción molar de un gas

La cantidad de cada componente de una mezcla gaseosa se puede medir en términos de fracción molar. Esto se refiere a la proporción del número de moles de un componente específico en comparación con el número total de moles en la mezcla. A temperatura y presión estándar (0 °C y 1 atm), un mol de gas ocupa 22,4 litros. Para calcular el peso molecular aparente de la mezcla, es necesario conocer la fracción molar de cada componente de esta, que se determina en base al volumen.



1.7.19. Tubo de Pitot

El tubo de Pitot es una herramienta utilizada para determinar la velocidad de un líquido o gas que fluye a través de un canal abierto. Aunque su uso es simple, es importante tener en cuenta que, en realidad, se basa en principios complejos de flujo fluido y debe ser tratado como un instrumento sofisticado.

1.7.20. Medidor de orificio

Un medidor de orificio es un dispositivo que utiliza un agujero circular en una placa delgada y plana situada entre bridas en una unión de una tubería para medir el flujo de un líquido o gas. La placa se coloca a 8 diámetros corriente arriba y 2 diámetros corriente abajo de cualquier obstrucción o perturbación del flujo, perpendicular al eje de la tubería, con el agujero en el centro de la tubería.

a) Ajuste de presión en el manómetro de un medidor de orificio calibrado (ΔH)

El término ΔH se utiliza para describir el ajuste de presión en el manómetro de un medidor de orificio calibrado. Durante la calibración del medidor, ΔH se utiliza para definir un flujo específico a través del medidor. En el uso práctico, se utiliza un nomógrafo para calcular ΔH , que se relaciona con el flujo a través del medidor y la velocidad del gas que entra en la boquilla de muestreo. La velocidad del gas en la boquilla de muestreo se determina de manera indirecta a través del flujo.

b) Nomógrafo

El nomógrafo de muestreo de la fuente es esencialmente una regla de cálculo. El nomógrafo resuelve la ecuación isocinética para el método de muestreo de tren de la EPA 5. Luego, se puede ajustar la tasa de flujo a través del tren de muestreo para que corresponda a la velocidad del gas de muestreo. En la actualidad los equipos de



muestreo son automatizados y sus cálculos se los realizan a través de software especializado.

c) Ajuste del manómetro del medidor de orificio ($\Delta H_{@}$)

Término designado que se utiliza para describir el ajuste del manómetro del medidor de orificio que permitirá que 0,021 m³/min de aire seco a 20 °C y 101.320,75 Pa fluyan a través del medidor. Una definición matemática condensada se da en la ecuación (1-36).

$$\Delta H_{@} = \frac{0,9244}{K_m^2} \quad (1-36)$$

Dónde:

0,9244 = una constante para condiciones y unidades definidas.

K_m = factor de calibración del medidor de orificio.



CAPÍTULO 2

Meteorología de la contaminación
atmosférica

CAPÍTULO 2 METEOROLOGÍA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

2

El capítulo se enfoca en la meteorología de la contaminación atmosférica. En primer lugar, se proporcionan conceptos básicos sobre la atmósfera y su composición, así como las diferentes capas que la componen, incluyendo la capa límite planetaria. Se discute la importancia de entender la meteorología en relación con la contaminación del aire. Además, se profundiza en el balance térmico de la atmósfera y su distribución mundial del calor. También se describen las diferentes estructuras dinámicas de la atmósfera, incluyendo la circulación atmosférica, la presión atmosférica, el viento y las diferentes fuerzas que afectan a la atmósfera. Se describen los diferentes sistemas de presión, como el sistema de presión alta del Pacífico y el sistema de presión alta de las Bermudas. Finalmente, se discuten las estaciones meteorológicas, incluyendo las portátiles y las estacionarias, y los diferentes sensores utilizados en estas estaciones.

2.1. Meteorología y atmósfera

En esta sección se presenta una breve descripción de la meteorología y una visión general de la atmósfera, con el objetivo de entender el transporte y dispersión de los contaminantes del aire.

La atmósfera es el medio en el que se dispersan los contaminantes del aire y la ciencia que estudia este fenómeno se llama meteorología. La meteorología de la contaminación del aire es el estudio de los procesos atmosféricos y su impacto en la dispersión de los contaminantes atmosféricos. Entre estos procesos se encuentran el movimiento del aire por el viento y el intercambio de calor por convección y radiación.



El conocimiento de la meteorología de la contaminación del aire es esencial para el manejo y control de las emisiones de contaminantes al aire en exteriores.

2.1.1. Composición de la atmósfera

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea la Tierra y gira junto con ella alrededor del sol. La composición del aire seco atmosférico está compuesta principalmente por 78% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno y un 1% de Argón aproximadamente. También contiene otros gases en pequeñas cantidades, como Dióxido de carbono, Neón y Helio. Un componente de vital importancia en la atmósfera es el vapor de agua, que, aunque su contenido es mínimo, absorbe seis veces más radiación que cualquier otro componente.

2.1.2. Capas de la atmósfera

La atmósfera está dividida en cuatro capas: tropósfera, estratósfera, mesósfera y termósfera. La primera capa que se encuentra desde la superficie terrestre hasta el espacio es la tropósfera. Esta capa contiene aproximadamente tres cuartos (3/4) de la masa atmosférica y está compuesta por casi todos los componentes hídricos de la atmósfera (vapor, nubes y precipitación).

La tropósfera es la capa que determina el clima de la Tierra. Es la capa más agitada, donde se encuentran las masas de aire, los frentes (zonas que separan dos masas de aire con diferentes temperaturas) y las tormentas. El espesor de la tropósfera varía según la latitud y la estación del año. Por ejemplo, sobre el ecuador la parte superior de la tropósfera se encuentra a unos 16,5 km (54.000 pies) y sobre los polos a 8,5 km (28.000 pies). El espesor de la tropósfera también varía según la temperatura atmosférica, siendo mayor en verano que en invierno (Spedding, 2021).



La mayor parte de la contaminación del aire se emite en la tropósfera. La velocidad y la dirección del viento son los factores determinantes en el transporte de la contaminación. La estructura térmica de la atmósfera y la agitación mecánica del aire debido al desplazamiento por accidentes geográficos influyen directamente en la tasa de dispersión de los contaminantes. Además, las sustancias contaminantes emitidas en el aire son transformadas por la radiación solar, la humedad y otros componentes de la atmósfera. Es importante tener en cuenta que la remoción de los contaminantes no solo depende de sus características, sino también de fenómenos climáticos como la lluvia, la nieve y la niebla (Londoño, 2019).

2.1.3. Capa límite planetaria (Planetary Boundary Layer)

La capa límite planetaria (CLP) es la región de la troposfera que se encuentra en contacto directo con la superficie terrestre y es directamente influenciada por ella a través de procesos turbulentos, interacción térmica y mecánica. Esta capa, cuya profundidad varía a lo largo del día y de la ubicación geográfica, es fundamental para comprender los fenómenos meteorológicos y la interacción entre la atmósfera y la superficie terrestre.

La capa límite planetaria se divide en cuatro componentes principales, que se diferencian según sus características dinámicas y térmicas, y su distancia respecto a la superficie terrestre:

- a) Capa superficial: es la capa más cercana a la superficie terrestre, con un espesor de aproximadamente 10 a 100 metros. Se caracteriza por una alta tasa de interacción entre la atmósfera y la superficie, debido a la fricción y la transferencia de calor y humedad. Los procesos turbulentos son intensos en esta capa, y las variaciones de temperatura y humedad son rápidas.



- b) Capa de mezclado: se encuentra por encima de la capa superficial y puede extenderse hasta 1-2 km de altura. Esta capa se caracteriza por la turbulencia generada por la convección térmica, lo que resulta en una mezcla eficiente de aire y una distribución homogénea de temperatura, humedad y concentraciones de contaminantes. Durante el día, la capa de mezclado se expande debido al calentamiento de la superficie, mientras que por la noche se contrae debido al enfriamiento.

- c) Capa estable: se encuentra por encima de la capa de mezclado y está caracterizada por una estratificación estable de temperatura, lo que limita la turbulencia y la mezcla vertical. Esta capa se forma especialmente durante la noche, cuando la superficie terrestre se enfría rápidamente y el aire en contacto con ella se enfría también, haciéndose más denso que el aire en altitudes superiores. La capa estable actúa como una barrera que impide el intercambio de aire entre la capa de mezclado y la atmósfera libre.

- d) Capa residual: es una capa que se forma por encima de la capa estable durante la noche y contiene aire turbulento y contaminantes que han quedado atrapados desde el día anterior. Esta capa se mezcla con la capa de mezclado durante el día siguiente, cuando la convección térmica vuelve a ser intensa.

En cuanto a la profundidad y las características de la capa límite planetaria pueden ser afectadas por diversos factores, entre los que se incluyen el calentamiento y enfriamiento diurno de la superficie terrestre, la radiación solar, la topografía, la vegetación, la presencia de cuerpos de agua y la presión atmosférica. Estos factores interactúan de manera compleja, dando lugar a cambios en la estructura y el comportamiento de la capa límite planetaria a lo largo del tiempo y el espacio.



2.1.4. Importancia de la meteorología de la contaminación del aire

Los parámetros meteorológicos son factores que influyen directamente en el transporte y la dispersión de las emisiones de contaminantes atmosféricos. Su comprensión permite planificar de manera más efectiva la calidad del aire. Por ejemplo, se pueden utilizar para ubicar técnicamente las estaciones de monitoreo y predecir los impactos ambientales de nuevas fuentes o determinar los efectos causados por fuentes existentes. Si las condiciones meteorológicas no favorecen la dispersión de sustancias contaminantes, los entes encargados de controlar la contaminación del aire deben actuar inmediatamente para evitar efectos adversos en el aire que respiramos. Cuando los niveles de contaminación son excesivamente altos, uno de los métodos inmediatos para controlarlos es reducir las emisiones a la atmósfera.

Un caso real de contaminación del aire sucedió en Donora en 1948. La ciudad estaba ubicada en un valle rodeado de colinas onduladas y los habitantes estaban acostumbrados a las emisiones provenientes de la fábrica local de acero, las fundiciones de zinc y las plantas de ácido sulfúrico. Sin embargo, no estaban preparados para enfrentar una contaminación atmosférica extremadamente alta que se produjo en la ciudad. Durante cinco días, las condiciones meteorológicas causaron vientos ligeros y nieblas densas que impidieron que el aire se moviera horizontal o verticalmente, lo que provocó que se acumulara sobre la ciudad mientras las fábricas seguían operando y emitiendo sustancias contaminantes. Como resultado, 22 personas murieron y un gran número de habitantes se enfermó. Finalmente, el patrón climático cambió, los vientos aumentaron y empezó a llover, disminuyendo las altas concentraciones de contaminantes (Londoño, 2019).



2.2. Balance térmico de la atmósfera

El balance térmico de la atmósfera es un concepto fundamental para entender cómo se distribuye el calor en nuestro planeta. La atmósfera recibe energía de la radiación solar, la cual es transferida hacia la superficie terrestre y a su vez, es devuelta hacia la atmósfera en forma de calor. Esta transferencia de energía se da a través de distintos procesos, como la duración de la luz del día y el ángulo de los rayos solares, los cuales determinan la cantidad de energía que es absorbida por la superficie terrestre en diferentes partes del planeta. La distribución del calor también está influenciada por el calentamiento diferencial de la Tierra, que genera patrones de viento y corrientes oceánicas. Además, el transporte de calor y su distribución mundial son factores clave para comprender cómo se mantiene el equilibrio térmico en nuestro planeta.

2.2.1. Radiación e insolación

Para que se produzcan los procesos atmosféricos se requiere energía, que proviene del sol. La energía se transfiere a través de ondas electromagnéticas, conocidas como radiación de calor. El pico de transmisión de la radiación solar se encuentra en el rango visible del espectro electromagnético, entre 0,38 y 0,78 micrómetros (μm). Además, el sol también emite energía en las regiones ultravioleta e infrarroja. La energía solar emitida se encuentra en un 99% en longitudes de onda entre 0,5 y 40 μm . El vapor de agua absorbe fuertemente las longitudes de onda más largas de 2,5 μm , así como el dióxido de carbono presente en la atmósfera. El nitrógeno y el oxígeno de la atmósfera absorbe fuertemente la radiación en longitudes de onda menores de 0,29 μm . La radiación solar con longitudes de onda entre 0,29 y 2,5 μm es la que llega a la Tierra (Spedding, 2021).

La insolación es la cantidad de radiación solar recibida en una hora y un lugar específico del sistema tierra-atmósfera, la misma que, está determinada por cuatro



factores: constante solar, transparencia de la atmósfera, duración de la luz del día y ángulo con el que los rayos solares caen sobre la Tierra.

a) Constante solar

La cantidad promedio de radiación recibida en un punto perpendicular a los rayos solares, ubicado fuera de la atmósfera en la distancia media entre la Tierra y el Sol se conoce como constante solar. La cantidad de energía del Sol y la distancia de la Tierra respecto a este hace que la cantidad real de radiación solar que se recibe en el borde exterior de la atmósfera varíe ligeramente. Es importante tener en cuenta que la Tierra se encuentra mucho más cerca del Sol en enero que en junio. Para determinar la cantidad de insolación que realmente recibe la Tierra, lo que influye en el clima, los factores más importantes son la transparencia de la atmósfera, la duración de la luz del día y el ángulo de caída de los rayos solares, en lugar de las ligeras variaciones que son triviales.

b) Transferencia

La cantidad de insolación que llega a la Tierra está relacionada con la transferencia de la atmósfera. La atmósfera actúa como un filtro, ya que agota la radiación emitida mientras pasa a través de ella. Los diferentes compuestos atmosféricos absorben o reflejan la energía de distintas formas y en diferentes cantidades. La transferencia de la atmósfera se refiere al monto en que la radiación penetra en la atmósfera y llega sin agotarse a la superficie terrestre.

El porcentaje de energía solar incidente que una superficie en la Tierra refleja al espacio se llama albedo. Por lo tanto, diferentes superficies, como agua, nieve, arena entre otros, tendrán diferentes valores de albedo. Si se observa a la Tierra y su atmósfera como un todo, se ha determinado que el valor promedio del albedo es del



30% cuando hay condiciones generales de nubosidad sobre la Tierra. Este índice es mayor en un rango visible de longitudes de onda.

El vapor de agua, principalmente, y algunos gases presentes en la atmósfera absorben la radiación solar, lo que resulta en una cantidad menor de radiación llegando a la superficie terrestre. El vapor de agua representa el 3% de la atmósfera, pero absorbe la radiación solar seis veces más que todos los gases combinados. Como resultado, la cantidad de radiación recibida es considerablemente menor que la recibida fuera de la atmósfera, representada por la constante solar.

Es importante tener en cuenta que todos los cuerpos emiten energía en longitudes de onda a lo largo del espectro electromagnético, no solo el Sol. Los cuerpos que emiten longitudes de onda más cortas son los cuerpos cálidos, mientras que los cuerpos que emiten longitudes de onda más largas son los cuerpos fríos. El Sol tiene su transmisión en un pico del rango visible de 0,38 a 0,78 μm y nuestro planeta Tierra emite su radiación máxima en longitudes de onda considerablemente más largas en el rango de 10 μm , es decir, este rango se encuentra dentro de la región infrarroja (Londoño, 2019).

Esto nos lleva a la conclusión de que la Tierra se calienta cuando absorbe energía y se enfría cuando la emite. De la misma manera, la Tierra absorbe y emite radiación al mismo tiempo. La superficie terrestre se calentará cuando absorba más energía que la que emita y se enfriará cuando emita más energía que la que absorba.

Nuestro planeta Tierra emite radiación terrestre de longitudes de onda más largas y absorbe radiación solar de onda corta. La radiación terrestre es absorbida en la atmósfera por las nubes, el vapor de agua y, en menor medida, por el dióxido de carbono, lo que provoca que la atmósfera se caliente, absorbiendo más radiación terrestre que solar. Además, la atmósfera emite energía hacia el espacio exterior y devuelve a la superficie terrestre. Esto permite que la radiación no se pierda en el espacio y explica por qué en las noches nubladas el aire es más cálido que en las



noches despejadas. Durante el día y la noche, el sistema Tierra-atmósfera emite continuamente radiación terrestre. Este intercambio de energía permite que la superficie terrestre se caliente mucho más que si la atmósfera no irradiara energía a la Tierra. Este fenómeno se conoce como efecto invernadero.

Según se ha demostrado por la comunidad científica, gases como el metano y el dióxido de carbono, así como otros gases de comportamiento similar conocidos como gases de efecto invernadero, contribuyen a aumentar la capacidad de la atmósfera para absorber la radiación solar, lo que provoca un calentamiento más rápido de lo normal en la Tierra. Un gran número de científicos creen que este efecto se ha intensificado debido a las emisiones generadas por el ser humano, y prevén que se producirán cambios climáticos graduales si esta tendencia continúa (Ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1
Gases de efecto invernadero

Gas del efecto invernadero	% del total de los gases de efecto invernadero	Fuentes y % del total de los gases de efecto invernadero
Dióxido de carbono (CO ₂)	76	Combustión de combustibles fósiles (56%) Cambios en el uso de la tierra (17%) Otros procesos naturales e industriales (3%)
Metano (CH ₄)	16	Agricultura y residuos (60%) Extracción y uso de combustibles fósiles (20%) Quema de biomasa e incendios forestales (10%) Humedales y otros procesos naturales (10%)
Óxidos nitrosos (N ₂ O)	6	Agricultura y suelos (60%) Combustión de combustibles fósiles e industriales (20%) Quema de biomasa e incendios forestales (10%) Océanos y otros procesos naturales (10%)
Otros gases	2	

Nota. Adaptado de (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).



La latitud y la nubosidad son factores determinantes en la transparencia. En las latitudes intermedias se presenta una capa atmosférica reflectora de dispersión más espesa la cual es atravesada por los rayos solares. Las estaciones son factores que determinan este efecto, cuando el eje terrestre se aleja del sol en invierno es mayor y ocasiona que los rayos solares sean menos intensos en el horizonte.

c) Duración de la luz del día

La insolación total recibida será mayor cuando la duración de la luz del día sea más larga, lo que provoca una mayor exposición al Sol. La latitud y las estaciones son factores predominantes para la duración de la luz del día. Se observa que la duración del día y la noche son iguales en la zona ecuatorial, mientras que el período de luz del día alcanza un máximo de 24 horas en verano y un mínimo de cero horas en invierno en las regiones polares.

d) Ángulo de los rayos

Los rayos solares caen sobre la Tierra con un ángulo variable que depende del movimiento del sol respecto a la zona ecuatorial. Las áreas donde los rayos solares caen de forma perpendicular en una superficie reciben una mayor insolación, mientras que en las áreas donde los rayos solares caen oblicuamente reciben una menor insolación debido a que los rayos solares atraviesan las capas más densas de la atmósfera, dispersándose sobre una superficie más amplia. Este principio se aplica también al desplazamiento diario de los rayos solares, por lo que la intensidad de la insolación es mayor al mediodía y menor durante la mañana y la tarde, debido a que el sol se encuentra en un ángulo bajo.

2.2.2. Balance térmico

El balance térmico es un concepto crucial en el estudio del clima y la meteorología. Se refiere al equilibrio entre la energía que la Tierra recibe del Sol y la



energía que emite de vuelta al espacio. Este equilibrio es fundamental para mantener la temperatura promedio del planeta y, en última instancia, para sustentar la vida en la Tierra.

La energía que llega a la Tierra proviene principalmente del Sol en forma de radiación electromagnética. Esta radiación incluye una amplia gama de longitudes de onda, desde la luz visible hasta los rayos ultravioleta e infrarrojos. La cantidad de energía solar que llega a la Tierra se denomina constante solar y equivale aproximadamente a 1.361 vatios por metro cuadrado (W/m^2).

Cuando la radiación solar llega a la atmósfera terrestre, parte de ella es absorbida por gases, aerosoles y nubes, mientras que otra parte es reflejada de vuelta al espacio. El albedo, que es la proporción de radiación solar reflejada en relación con la radiación incidente, juega un papel importante en este proceso. La superficie terrestre también absorbe y refleja energía solar. En general, aproximadamente el 30% de la radiación solar incidente es reflejada de vuelta al espacio, mientras que el 70% restante es absorbido por el sistema Tierra-atmósfera.

La energía absorbida por el sistema Tierra-atmósfera es convertida en calor y se redistribuye en la atmósfera y en la superficie terrestre. Posteriormente, esta energía es emitida nuevamente al espacio en forma de radiación infrarroja de onda larga, también conocida como radiación terrestre. La cantidad de radiación terrestre emitida por unidad de superficie se denomina emisividad.

El equilibrio térmico se alcanza cuando la cantidad de energía absorbida por el sistema Tierra-atmósfera es igual a la cantidad de energía emitida de vuelta al espacio. Este equilibrio es necesario para mantener la temperatura promedio del planeta en un nivel adecuado para la vida. Actualmente, la temperatura promedio de la superficie terrestre es de aproximadamente 15°C (59°F).

El balance térmico puede verse afectado por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos. Algunos ejemplos de factores naturales incluyen la actividad solar, los cambios en la órbita terrestre y las erupciones volcánicas. Por otro lado, las



actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la emisión de gases de efecto invernadero, también pueden alterar el balance térmico y, en consecuencia, el clima y la temperatura del planeta.

El sistema climático de la Tierra es altamente complejo e interconectado, y existen numerosos mecanismos de retroalimentación que pueden afectar el balance térmico. Estos mecanismos pueden ser positivos o negativos, dependiendo de si amplifican o atenúan el cambio inicial en el balance térmico.

Un ejemplo de retroalimentación positiva es el llamado "efecto albedo de hielo-nieve". A medida que la temperatura global aumenta, se derrite más hielo y nieve, lo que reduce el albedo terrestre y permite que se absorba más energía solar. Esto, a su vez, provoca un mayor calentamiento. Un ejemplo de retroalimentación negativa es la relación entre la temperatura y la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. A medida que la temperatura aumenta, la atmósfera puede contener más vapor de agua, lo que aumenta la emisión de radiación infrarroja de onda larga y, por lo tanto, facilita la liberación de energía al espacio.

La medición y el monitoreo del balance térmico de la Tierra son esenciales para comprender el clima y predecir posibles cambios futuros. Los científicos utilizan una combinación de observaciones directas, como las realizadas por satélites y estaciones meteorológicas, y modelos climáticos basados en computadora para analizar el balance térmico y sus variaciones a lo largo del tiempo.

En última instancia, el balance térmico juega un papel crucial en la vida en la Tierra, ya que regula la temperatura promedio del planeta, lo que a su vez influye en la habitabilidad de los ecosistemas y la supervivencia de las especies. La comprensión y el monitoreo del balance térmico son fundamentales para anticipar y enfrentar los desafíos que plantea el cambio climático, así como para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación.



2.2.3. Distribución del calor

El reparto de calor en la Tierra es un proceso complejo que afecta a todos los aspectos de nuestro clima y, en última instancia, a la vida en nuestro planeta. La distribución del calor está directamente relacionada con la circulación atmosférica y oceánica, así como con la variación estacional de la insolación y las diferencias latitudinales en la intensidad de la radiación solar recibida. A continuación, se analizarán los mecanismos y factores que influyen en la distribución del calor en la Tierra.

La distribución del calor en nuestro planeta se ve afectada por diversos factores, incluidos:

La inclinación del eje terrestre

La inclinación de aproximadamente 23,5 grados del eje terrestre con respecto al plano de su órbita alrededor del Sol causa variaciones estacionales en la distribución del calor. Durante el solsticio de verano, el hemisferio norte recibe más insolación, mientras que, durante el solsticio de invierno, es el hemisferio sur el que recibe más energía solar.

La latitud

La cantidad de energía solar que llega a la superficie de la Tierra varía según la latitud. La zona ecuatorial recibe una mayor cantidad de radiación solar durante todo el año debido a que los rayos del Sol llegan de forma más directa, mientras que las regiones polares reciben menos energía solar y, en consecuencia, son más frías.

La altitud

A mayor altitud, la temperatura del aire disminuye, lo que hace que las áreas montañosas sean generalmente más frías que las áreas a nivel del mar.



La distribución de tierra y agua

Los océanos y las masas de tierra tienen diferentes capacidades para absorber y liberar calor, lo que influye en la distribución del calor en la superficie terrestre. El agua tiene una mayor capacidad calorífica que la tierra, lo que significa que se calienta y se enfría más lentamente que la tierra. Esto resulta en diferencias de temperatura entre las áreas costeras y las áreas del interior de los continentes.

La circulación del aire y del agua en la atmósfera y los océanos es uno de los principales mecanismos de redistribución del calor en la Tierra. El aire y el agua se calientan en las áreas ecuatoriales y se enfrían en las áreas polares, lo que provoca la formación de corrientes que transportan el calor de las regiones más cálidas a las más frías.

En la atmósfera, las células de circulación se forman debido a las diferencias de temperatura entre el ecuador y los polos. Estas células son responsables de la formación de vientos alisios, vientos del oeste y vientos polares, que redistribuyen el calor y la humedad a lo largo de las latitudes.

En los océanos, las corrientes marinas también redistribuyen el calor a nivel global. Estas corrientes son impulsadas por diferencias de temperatura, salinidad y densidad del agua, así como por los vientos y la rotación de la Tierra. Un ejemplo importante de redistribución del calor a través de las corrientes oceánicas es la Corriente del Golfo, que transporta agua cálida desde el Caribe hacia el norte, a lo largo de la costa este de América del Norte y hasta el océano Atlántico Norte. Este proceso ayuda a moderar el clima en Europa Occidental, haciendo que sea más templado de lo que se esperaría en latitudes similares.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que permite que la Tierra mantenga una temperatura adecuada para la vida. Los Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua, atrapan parte de la energía solar que llega a la Tierra y la reemiten en forma de radiación infrarroja,



calentando la atmósfera. Este proceso ayuda a regular la distribución del calor en la Tierra y a mantener un equilibrio térmico.

Sin embargo, el aumento de las concentraciones de GEI debido a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación está intensificando el efecto invernadero y provocando un calentamiento global. Este calentamiento desequilibra la distribución del calor en la Tierra y puede tener graves consecuencias, como el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar y la alteración de los patrones climáticos.

2.2.4. Calentamiento diferencial

La energía térmica es absorbida en diferentes magnitudes por diferentes superficies terrestres, además de la radiación solar que se absorbe en distintas magnitudes. Esto se puede ver en la diferente absorción que tienen las masas de tierra y las masas de agua. La capacidad de almacenamiento y absorción del calor es diferente dependiendo del tipo de superficie terrestre, y el calentamiento o enfriamiento de la Tierra puede ser influenciado por el color, la vegetación, la textura de la superficie y la presencia de construcciones. En general, las superficies secas se calientan y enfrían mucho más rápido que las húmedas. Mientras que las playas de arena, las áreas aradas y los caminos pavimentados tienden a calentarse mucho más que las praderas y las áreas boscosas. En estas últimas, el aire de este tipo de terreno es más frío que el aire de un terreno arado durante el día y viceversa durante la noche. Este fenómeno se conoce como calentamiento diferencial y se refiere a la propiedad que permite que las diferentes superficies se calienten y enfríen a distintas velocidades (Londoño, 2019).

La confinación de la absorción de la energía térmica del sol se da en una capa de poca profundidad de la superficie terrestre, lo que explica por qué la superficie terrestre se calienta rápidamente durante el día y se enfría de igual manera durante la noche. En cambio, el calor se transfiere al agua desde la fuente de calor, como el Sol



o el aire, y se distribuye por todo el cuerpo de agua. La razón por la cual la superficie del agua se calienta y enfría más lentamente que la superficie terrestre es porque el agua tiene una mayor capacidad calorífica, lo que significa que se necesita más energía para elevar su temperatura. Además, las superficies acuáticas son más fácilmente penetradas por los rayos solares, el agua tiene mayor calor específico y por lo tanto requiere una mayor cantidad de calor para cambiar su temperatura. En otras palabras, la energía térmica profundiza más en el agua que en la superficie terrestre, por lo que demanda mayor energía para calentar toda la masa de agua e igualmente tarda más en liberar todo ese calor absorbido.

2.2.5. Transporte de calor

El transporte de calor en la atmósfera es fundamental para la distribución de energía y el mantenimiento del equilibrio térmico en la Tierra. Los principales mecanismos de transporte de calor incluyen la conducción, la convección y la advección, que juegan un papel importante en la determinación de las condiciones meteorológicas y climáticas a nivel local y global.

a) Conducción

La conducción es el proceso de transferencia de energía térmica a través de una sustancia sin movimiento neto de la materia. En la atmósfera, la conducción ocurre principalmente en la capa límite superficial, donde el aire en contacto con la superficie terrestre se calienta debido a la transferencia de energía térmica desde la superficie.

Aunque la conducción no es el mecanismo dominante de transporte de calor en la atmósfera, es importante en la transferencia de calor desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Este proceso influye en la formación de la capa límite superficial, que es la capa más baja de la atmósfera en contacto directo con la superficie terrestre.



b) Convección

La convección es el proceso de transferencia de calor mediante el movimiento de masas de aire con diferentes temperaturas. En la atmósfera, la convección se produce cuando el aire caliente y menos denso se eleva, mientras que el aire más frío y denso desciende.

La convección es un mecanismo clave en la transferencia de calor en la atmósfera y tiene un impacto significativo en las condiciones meteorológicas y climáticas. Algunas de las implicaciones de la convección en la atmósfera incluyen:

- Desarrollo de nubes y precipitaciones: la convección es responsable de la formación de nubes de desarrollo vertical, como los cumulonimbos, que pueden generar precipitaciones intensas y tormentas eléctricas.
- Distribución vertical de la humedad: la convección contribuye a la distribución vertical de la humedad en la atmósfera al transportar aire húmedo desde la superficie hacia niveles más altos.
- Circulación atmosférica: la convección juega un papel importante en la circulación atmosférica a gran escala, como la célula de Hadley, que es un patrón de circulación que transporta aire caliente desde el ecuador hacia latitudes medias.

c) Advección

La advección es el proceso de transporte de calor horizontalmente a través de la atmósfera por el movimiento de masas de aire. A diferencia de la convección, que implica movimiento vertical, la advección se refiere al movimiento horizontal de aire caliente o frío.



La advección es un mecanismo esencial en la transferencia de calor en la atmósfera y afecta significativamente las condiciones meteorológicas y climáticas en diferentes escalas. Algunas de las implicaciones de la advección en la atmósfera incluyen:

Cambios en las temperaturas locales: la advección puede provocar cambios notables en las temperaturas locales al transportar aire caliente o frío hacia nuevas áreas. Por ejemplo, una advección de aire frío puede causar un descenso en las temperaturas, mientras que una advección de aire caliente puede generar un aumento en las temperaturas.

Formación de frentes

La advección es un proceso clave en la formación de frentes, que son zonas de transición entre masas de aire con propiedades diferentes. Por ejemplo, en un frente frío, la advección de aire frío desplaza a una masa de aire caliente, lo que puede generar nubes y precipitaciones.

Distribución horizontal de la humedad

La advección también contribuye a la distribución horizontal de la humedad en la atmósfera al transportar aire húmedo o seco hacia nuevas áreas. Esto puede afectar la formación de nubes y las condiciones meteorológicas en diferentes regiones.

Modulación del clima regional

La advección de masas de aire con diferentes características puede tener un impacto en el clima regional, como el transporte de aire húmedo desde los océanos



hacia las áreas costeras, lo que puede generar un clima más húmedo y lluvioso en esas regiones.

Los mecanismos de transporte de calor en la atmósfera no actúan de manera aislada. En cambio, interactúan y se influyen mutuamente en diferentes escalas de tiempo y espacio. Por ejemplo, la conducción en la capa límite superficial puede generar diferencias de temperatura que impulsan la convección y, a su vez, la advección puede modificar la distribución de energía térmica en la atmósfera, lo que afecta la convección.

2.2.6. Distribución mundial del calor

La latitud es el factor que influye en la insolación, por lo que la medida de la insolación total anual es mucho mayor en el ecuador y disminuye gradualmente hacia los polos. De hecho, la cantidad de insolación recibida en el ecuador es cuatro veces mayor que en los polos.

El balance térmico se da cuando se observa la Tierra como un todo y se ve que las ganancias de energía solar equivalen a las pérdidas de energía hacia el espacio, además de que la región ecuatorial recibe más energía de la que regresa al espacio. Esto hace que se distribuya de manera uniforme alrededor de la Tierra a través de las constantes circulaciones atmosféricas y oceánicas desde latitudes altas a bajas.

El aire cálido es conducido desde el ecuador hacia los polos a través de la atmósfera, lo que ocurre durante todo el año, siendo menor en verano que en invierno. La ganancia de energía es almacenada en las capas superficiales de la Tierra y principalmente en el océano. El 40% de la energía es transportada del ecuador hacia los polos por los océanos, mientras que el 60% se debe al movimiento del aire (Spedding, 2021).



2.3. La estructura dinámica de la atmósfera

La variación de insolación y el calentamiento diferencial causan un desequilibrio en la presión atmosférica, el cual se equilibra mediante el movimiento del aire en forma como brisas suaves, huracanes, tormentas eléctricas, entre otras.

2.3.1. Circulación atmosférica

El calentamiento diferencial de la superficie provoca un desequilibrio en la presión, lo que hace que el aire se mueva constantemente para equilibrarla. El viento es influenciado directamente por la fricción que se produce al desplazarse desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión. El viento en altura se comporta de manera muy diferente al viento superficial debido a la fricción ejercida por la superficie terrestre. Aunque la rotación de la Tierra modifica la circulación atmosférica, no la produce, ya que en esencia la atmósfera gira junto con la Tierra. Este movimiento es muy importante en cuanto a la liberación de contaminantes atmosféricos, ya que evita que las concentraciones alcancen niveles peligrosos.

Los contaminantes pueden desplazarse hacia otros lugares producto del viento, lo que puede afectar a la calidad del aire y a la salud de las personas y los ecosistemas. Algunos factores que pueden alterar la circulación atmosférica y favorecer la acumulación de contaminantes son la inversión térmica, el relieve geográfico o las corrientes marinas.

2.3.2. Presión atmosférica

El aire es una mezcla de gases compuesto por moléculas que están en constante y errático movimiento a gran velocidad, lo que permite comprender que, aunque el aire no sea visible, tiene un peso determinado. La temperatura del gas es un factor que influye directamente en la velocidad del movimiento de sus moléculas. La



presión atmosférica se da por las moléculas de los gases que componen el aire, como el oxígeno o el nitrógeno, que chocan entre sí, con otros objetos y rebotan. Está en función del número de sus moléculas atmosféricas contenidas en un determinado volumen y su velocidad de desplazamiento.

Cuando el aire se encuentra confinado dentro de ciertos límites, su presión aumenta cuando se calienta y disminuye cuando se enfría. Además, cuando el aire se confina en un espacio más pequeño, su presión tiende a aumentar, mientras que disminuye cuando se expande a un espacio mayor. El peso del aire de la capa superior es el factor determinante de la presión atmosférica, ya sea en la atmósfera o en la superficie terrestre, es decir, en cualquier ubicación.

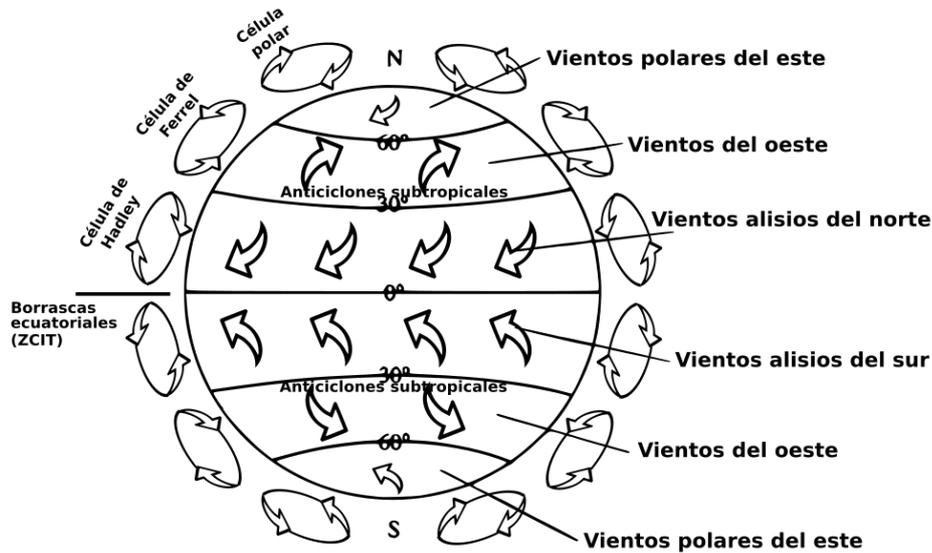
2.3.3. Viento

El transporte de calor y otras condiciones atmosféricas alrededor de la Tierra es realizado por el viento, ya sea en pequeñas ráfagas o en grandes masas de aire. Sin embargo, el efecto Coriolis, que surge como resultado de la rotación de la Tierra, tiene una influencia importante en la dirección y velocidad del viento. En el hemisferio norte, el efecto Coriolis desvía el movimiento del viento hacia la derecha, lo que significa que el viento que se mueve hacia el norte se desvía hacia el este y el viento que se mueve hacia el sur se desvía hacia el oeste. En el hemisferio sur, el efecto Coriolis desvía el movimiento del viento hacia la izquierda.



Figura 2-1

Distribución de los vientos a escala planetaria



Por lo tanto, el viento del norte en el hemisferio norte se desvía hacia el este, mientras que el viento del oeste en el hemisferio norte se desvía hacia el sur. Es importante destacar que los patrones de viento prevalentes en una región están influenciados por una variedad de factores, incluyendo la topografía, la temperatura del aire y la presión atmosférica. En resumen, el efecto Coriolis es un factor importante que considerar cuando se estudia la dirección y velocidad del viento alrededor de la Tierra, y puede influir en la formación de patrones de viento prevalentes.

La disminución de la carga de fricción es determinante en la velocidad del viento, y la velocidad del viento aumenta rápidamente con la altura sobre el nivel del suelo. El viento está conformado por ráfagas de dirección ligeramente variable, separadas por intervalos, lo que indica que no es constante. Las turbulencias son contribuyentes al movimiento de calor, humedad y polvo en el aire en altura. Dentro de las turbulencias del viento se encuentran las ráfagas, que son producidas por las



irregularidades de la superficie, creando remolinos. Estas variaciones de la corriente principal del flujo del viento son causadas por convección o transporte vertical del calor.

2.3.4. Fuerza de Coriolis

Si la Tierra no rotara, el aire se movería en línea recta desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión. Sin embargo, debido a la rotación de la Tierra, el aire parece desviarse cuando es observado desde la superficie. Esto es causado por la fuerza de Coriolis, una fuerza aparente que hace que el aire se desvíe hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur debido a la rotación del planeta y el movimiento del aire. Desde el espacio, el movimiento del aire (o de cualquier objeto en movimiento libre) sigue una línea recta, pero para alguien en la Tierra, parece haber sido desviado, todo este proceso es explicado mediante la Ley de Ferrel.

Esta ley desarrollada por el meteorólogo estadounidense William Ferrel en el siglo XIX, establece que, en el hemisferio norte, los objetos en movimiento hacia el este, como las masas de aire, se desvían hacia el norte debido a la rotación de la Tierra en sentido contrario a las manecillas del reloj. Por otro lado, los objetos en movimiento hacia el oeste se desvían hacia el sur.

En el hemisferio sur, los objetos en movimiento hacia el este se desvían hacia el sur, mientras que los objetos en movimiento hacia el oeste se desvían hacia el norte. Esta desviación es conocida como efecto Coriolis y se produce porque la velocidad de la rotación de la Tierra varía según la latitud.



2.3.5. Fuerza del gradiente de presión

La fuerza del gradiente de presión es un fenómeno fundamental en la atmósfera que afecta directamente la formación y circulación de los vientos en la Tierra. Es importante comprender este concepto para entender cómo se generan y se mueven las masas de aire y cómo influyen en el clima y el tiempo atmosférico.

El gradiente de presión es la tasa de cambio de la presión atmosférica en una dirección específica. Se mide en unidades de presión por unidad de distancia, como milibares por kilómetro (mb/km) o Pascales por metro (Pa/m). Los gradientes de presión pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la dirección en la que se analizan.

La fuerza del gradiente de presión es la fuerza que actúa sobre una masa de aire debido a las diferencias de presión en la atmósfera. Esta fuerza es directamente proporcional al gradiente de presión y actúa en sentido perpendicular a las isobaras, es decir, las líneas de igual presión. La fuerza del gradiente de presión es la responsable de generar movimientos en la atmósfera, como el viento.

El viento es el resultado de la interacción entre la fuerza del gradiente de presión y otras fuerzas atmosféricas, como la fuerza de Coriolis y la fricción. Cuando la fuerza del gradiente de presión es la única fuerza que actúa sobre una masa de aire, esta se desplazará desde las áreas de alta presión hacia las de baja presión en un movimiento rectilíneo.

Sin embargo, en la realidad, la fuerza de Coriolis, que resulta de la rotación de la Tierra, desvía la dirección del viento hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Además, la fricción con la superficie terrestre también afecta la velocidad y dirección del viento.



El estudio de la fuerza del gradiente de presión es una herramienta clave en la investigación y predicción meteorológica. Los modelos numéricos del tiempo y el clima incluyen la fuerza del gradiente de presión y otras fuerzas atmosféricas para simular y predecir la evolución de los sistemas meteorológicos. Estos modelos permiten a los meteorólogos anticipar fenómenos como tormentas, huracanes y cambios en las condiciones atmosféricas que pueden afectar a la población y a la agricultura.

2.3.6. Fricción

La fricción actúa sobre el viento cerca de la superficie terrestre y en altitudes de aproximadamente 500 a 1.000 metros, en una capa llamada capa límite planetaria o atmosférica. Arriba de esta capa, la fricción deja de influir en el viento y las fuerzas de Coriolis y gradiente de presión están equilibradas. Esto produce un viento que sopla paralelo a las líneas de igual presión, conocido como viento geostrófico. En el hemisferio norte, las áreas de baja presión se encontrarán a la izquierda del viento, mientras que en el hemisferio sur ocurrirá lo opuesto.

La fricción, la fuerza de Coriolis y la fuerza de gradiente de presión tienen un efecto en el viento dentro de la capa de fricción. Cuando el viento se acerca a la superficie terrestre, la fricción ejerce un mayor impacto sobre él. También es más influyente cuando la superficie es irregular, como en una zona urbana, en comparación con una gran extensión de agua. La fricción disminuye tanto la velocidad del viento como su dirección.

La fuerza de Coriolis es proporcional a la velocidad del viento y disminuye cuando la velocidad del viento disminuye. La fricción afecta al viento en altitudes más bajas dentro de la capa de fricción, reduciendo tanto la velocidad del viento como la fuerza de fricción. Esto hace que la fuerza de Coriolis sea menos dominante en comparación con la fuerza de gradiente de presión, que no equilibra la fuerza de



Coriolis como ocurre con el viento geostrófico por encima de la capa límite planetaria. En su lugar, la fuerza de gradiente de presión es más dominante y desplaza el viento hacia la presión baja. La dirección del viento se dirige hacia la presión baja hasta que la fuerza friccional y la fuerza de Coriolis equilibren exactamente la fuerza de gradiente de presión.

Cuando la fricción aumenta, el viento gira bruscamente hacia la presión baja. Este cambio en la dirección del viento a diferentes altitudes dentro de la capa de fricción se llama espiral de Ekman. A medida que el viento asciende a altitudes más altas, la curvatura de su dirección disminuye hasta que la fricción deja de afectar su movimiento, como ocurre con el viento geostrófico.

2.3.7. Sistemas de presión

La dirección del viento en la superficie terrestre es determinada por varias fuerzas. En el hemisferio norte, los vientos superficiales giran en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor de las áreas de baja presión (ciclones). Este mismo proceso también hace que el aire se mueva en dirección a las agujas del reloj alrededor de las áreas de alta presión (anticiclones). En el hemisferio sur, el proceso es inverso.

2.3.8. Sistema de presión alta del Pacífico

En el lado este de los anticiclones semipermanentes, el viento que sopla en dirección a las agujas del reloj alrededor del sistema de alta presión refuerza la capa de inversión. El aire se enfría al entrar en contacto con el agua fría del océano, afectando a la región sur de California, que se encuentra en el lado este del sistema de alta presión del Pacífico. Las inversiones de temperatura, que impiden la mezcla vertical de contaminantes del aire, son comunes en esta área, lo que puede llevar a la acumulación de contaminantes del aire a niveles peligrosos en la capa inferior de la atmósfera bajo la capa de inversión.



2.3.9. Sistema de presión alta de las Bermudas

En el lado oeste de los anticiclones permanentes, las condiciones son menos graves que en otros lugares. El viento que sopla en dirección a las agujas del reloj proviene de las áreas tropicales del sur, donde el aire es cálido y húmedo. El aire que se acumula en estas áreas de alta presión puede provocar inversiones de temperatura, aunque no son tan frecuentes ni tan intensas como las que afectan a las costas oeste de los continentes debido a la llegada de aire cálido. Esto es típico en el sudeste de Estados Unidos, donde el sistema de alta presión de las Bermudas en el océano Atlántico tiene un impacto en el transporte y dispersión de contaminantes.

2.3.10. Circulación general

El motor principal detrás de la circulación general es el calentamiento desigual de la superficie de la Tierra debido a la incidencia de la radiación solar. La zona ecuatorial recibe más energía solar que las regiones polares, creando un gradiente de temperatura que resulta en diferencias de presión atmosférica. Estas diferencias de presión provocan la circulación del aire desde las áreas de alta presión hacia las áreas de baja presión, dando lugar a la formación de patrones de circulación general.

Existen tres células principales de circulación en cada hemisferio que describen la circulación general del aire:

Célula de Hadley

Esta célula se extiende desde el ecuador hasta aproximadamente los 30° de latitud en ambos hemisferios. El aire se calienta en el ecuador, se eleva y se desplaza hacia los polos en la alta atmósfera. Luego, se enfría y desciende en torno a los 30° de latitud, creando áreas de alta presión y, finalmente, regresa al ecuador en la superficie.



Célula de Ferrel

Se extiende desde aproximadamente los 30° hasta los 60° de latitud en ambos hemisferios. La célula de Ferrel es una zona de transición entre las células de Hadley y polar. El aire en esta célula se mueve en dirección contraria a la rotación de la Tierra, creando vientos del oeste en las latitudes medias.

Célula polar

Esta célula abarca desde aproximadamente los 60° hasta los polos en ambos hemisferios. El aire frío en las regiones polares desciende, crea áreas de alta presión y se desplaza hacia el ecuador en la superficie. Al elevarse cerca de los 60° de latitud, se encuentra con el aire descendente de la célula de Ferrel, generando un frente polar.

Las células de circulación y los patrones de viento asociados tienen un impacto significativo en el clima y el tiempo a nivel global. Por ejemplo, las zonas de convergencia intertropical (ZCIT) son áreas donde los vientos alisios del hemisferio norte y sur convergen, lo que resulta en un clima húmedo y lluvioso en estas regiones. Por otro lado, las áreas de alta presión cerca de los 30° de latitud, donde el aire desciende en las células de Hadley, suelen estar asociadas con climas secos y desérticos.

El conocimiento de la circulación general es fundamental para comprender el clima y el tiempo en la Tierra, así como para predecir cambios a largo plazo en las condiciones atmosféricas. Además, la circulación general influye en la distribución de los ecosistemas, ya que determina en gran medida los patrones de precipitación y las características climáticas de una región.

La circulación general no es estática y puede verse afectada por diversos factores, como:



Variaciones estacionales

Los cambios en la posición del Sol y la inclinación de la Tierra a lo largo del año afectan la cantidad de energía solar que incide sobre la superficie terrestre, lo que altera los patrones de circulación.

Topografía y distribución de tierra y agua

La presencia de montañas, océanos y otros rasgos geográficos influye en la circulación del aire, ya que estos elementos pueden modificar los flujos de viento y las temperaturas locales.

Cambio climático

El aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, producto de la actividad humana, está provocando cambios en la circulación general al alterar las temperaturas globales y los patrones de precipitación.

Oscilaciones atmosféricas

Fenómenos naturales como El Niño, La Niña y la Oscilación del Atlántico Norte pueden causar variaciones en la circulación general, afectando a su vez el clima y el tiempo en diferentes partes del mundo.

2.3.11. Masas de aire

Las masas de aire se forman por una combinación de factores, incluyendo la temperatura de la superficie terrestre, la altitud, la presión atmosférica y la humedad relativa. Una vez que se han formado, las masas de aire se mueven a través de la



atmósfera impulsadas por los vientos, afectando el clima y las condiciones meteorológicas en las regiones a las que llegan.

Las masas de aire se clasifican en función de su origen, es decir, si se forman sobre el océano o la tierra. Las masas de aire marítimas se forman sobre el agua y son relativamente húmedas y frescas, mientras que las masas de aire continentales se forman sobre la tierra y son relativamente secas y cálidas. A medida que las masas de aire se mueven sobre la superficie terrestre, pueden recoger humedad o perderla, lo que afecta su temperatura y su contenido de humedad.

Las masas de aire también se clasifican según la latitud de su origen. Las masas de aire árticas se forman cerca del Polo Norte y son extremadamente frías y secas. Las masas de aire polares se forman en las regiones de alta latitud, como Groenlandia, Siberia y la Antártida, y son menos frías y más húmedas que las masas de aire árticas. Las masas de aire tropicales se forman en las regiones cálidas cerca del ecuador y son cálidas y húmedas.

Una vez que las masas de aire se han formado, pueden ser empujadas hacia nuevas regiones por los vientos. Cuando una masa de aire se mueve a través de una región, puede afectar las condiciones meteorológicas, la temperatura y la humedad de esa región. Si una masa de aire fría y seca se mueve a través de una región cálida y húmeda, puede provocar una disminución de la temperatura y una disminución en la humedad. Del mismo modo, una masa de aire cálida y húmeda que se mueve a través de una región fría y seca puede provocar un aumento en la temperatura y un aumento en la humedad.

2.3.12. Frentes

Los frentes son zonas de transición entre masas de aire con propiedades diferentes, como temperatura, humedad y presión. Estos fenómenos atmosféricos son



cruciales en el estudio de la meteorología, ya que influyen en la formación de nubes y precipitaciones y en la evolución del tiempo atmosférico. El frente frío es un tipo particular de frente que se caracteriza por la interacción entre aire frío y cálido.

Un frente frío es una zona de transición donde una masa de aire frío se desplaza y reemplaza a una masa de aire cálido. Este proceso genera un movimiento ascendente del aire cálido y húmedo, lo que puede dar lugar a la formación de nubes y precipitaciones.

Las principales características de un frente frío incluyen:

- **Pendiente:** Un frente frío típicamente tiene una pendiente de 1:50 a 1:150, lo que significa que, por cada kilómetro de distancia vertical cubierta por el frente, hay entre 50 y 150 km de distancia horizontal cubierta. La pendiente es más pronunciada en los frentes fríos que en los frentes cálidos.
- **Velocidad:** Los frentes fríos suelen moverse más rápido que los frentes cálidos, lo que les permite alcanzar y desplazar masas de aire cálido.
- **Temperatura:** La diferencia de temperatura entre las dos masas de aire puede ser significativa, lo que resulta en un cambio marcado en las condiciones meteorológicas.
- **Vientos:** Los vientos en un frente frío suelen ser más intensos y cambiantes en dirección que en un frente cálido.

Cuando un frente frío avanza, el aire cálido y húmedo se ve forzado a elevarse por encima del aire frío más denso. A medida que el aire cálido se eleva, se enfría y se expande, lo que puede llevar a la condensación y formación de nubes. Dependiendo de la humedad y las condiciones atmosféricas, estas nubes pueden generar precipitaciones, como lluvia, nieve o granizo.



Además de los frentes fríos, existen otros tipos de frentes que se diferencian por la naturaleza de las masas de aire que interactúan y su movimiento relativo. Entre ellos se encuentran:

Frente cálido

Es la zona de transición donde una masa de aire cálido avanza y reemplaza a una masa de aire frío. La pendiente de un frente cálido es menos pronunciada que la de un frente frío, y suelen generar nubes estratiformes y precipitaciones más ligeras y duraderas.

Frente ocluido

Ocurre cuando un frente frío alcanza y se fusiona con un frente cálido. En este caso, la masa de aire frío se desplaza debajo de la masa de aire cálido, elevándola por completo y separándola de la superficie terrestre. Las precipitaciones en un frente ocluido pueden ser similares a las de los frentes cálidos y fríos, dependiendo de las características de las masas de aire involucradas.

Frente estacionario

Es una zona de transición en la que dos masas de aire, una fría y otra cálida, no tienen movimiento relativo significativo entre sí. Los frentes estacionarios pueden generar nubes y precipitaciones, pero a menudo de menor intensidad y duración que los frentes en movimiento.

Los frentes, incluidos los frentes fríos, tienen un impacto significativo en el tiempo atmosférico y las condiciones meteorológicas. Pueden provocar cambios bruscos en la temperatura, la humedad y la velocidad del viento. Además, son



responsables de la formación de nubes y precipitaciones, lo que puede afectar a la visibilidad, las condiciones de las carreteras y la agricultura.

La predicción y el seguimiento de los frentes son cruciales en la meteorología y la climatología para anticipar cambios en el tiempo atmosférico y emitir alertas o advertencias. Los meteorólogos utilizan una combinación de observaciones de superficie, datos de satélites, radares meteorológicos y modelos numéricos para predecir y seguir el movimiento y evolución de los frentes.

2.3.13. Entrampamiento frontal

La inversión térmica es un fenómeno atmosférico que ocurre cuando una capa de aire cálido atrapa una capa de aire frío cerca de la superficie terrestre, impidiendo la circulación natural del aire y atrapando contaminantes en la capa inferior. Este fenómeno puede ser provocado tanto por frentes fríos como cálidos y tiene consecuencias significativas para la calidad del aire y el medio ambiente.

La inversión térmica es causada por diferentes factores meteorológicos, como la presencia de un frente cálido, donde una masa de aire más cálido se desplaza sobre una masa de aire más frío. El aire cálido se mueve lentamente, generando una agitación más suave en la superficie frontal y permitiendo que el aire cálido atrape al aire frío debajo de él. En el caso de un frente frío, el aire frío se mueve rápidamente por debajo del aire cálido, empujándolo hacia arriba y creando una inversión térmica.

El entrampamiento frontal causado por la inversión térmica puede tener graves consecuencias para la calidad del aire y la salud pública. Los contaminantes, como el smog y las partículas en suspensión, quedan atrapados cerca de la superficie terrestre, donde las personas y los animales respiran. Esto puede conducir a problemas de salud, como irritación en los ojos, garganta y pulmones, y afecciones respiratorias crónicas, como el asma.



Para enfrentar la inversión térmica y sus consecuencias, es fundamental que las autoridades y la población tomen medidas preventivas y correctivas. Estas incluyen:

a) Monitoreo constante de la calidad del aire

Es crucial tener un sistema de monitoreo eficiente que permita identificar rápidamente las áreas afectadas por la inversión térmica y tomar medidas adecuadas.

b) Regulaciones sobre emisiones

Es necesario establecer límites estrictos para las emisiones de contaminantes de vehículos, industrias y fuentes de calefacción, con el fin de reducir la concentración de contaminantes en el aire.

c) Fomento del transporte público y no motorizado

Promover el uso de transporte público y medios de transporte no motorizados, como la bicicleta, puede disminuir la cantidad de vehículos en circulación y, por ende, las emisiones contaminantes.

d) Creación de espacios verdes

Aumentar las áreas verdes en las ciudades puede ayudar a absorber parte de los contaminantes y mejorar la calidad del aire.

La inversión térmica es un fenómeno que afecta la calidad del aire y la salud de las personas y el medio ambiente. Es fundamental conocer las causas y consecuencias de este fenómeno para tomar medidas adecuadas y reducir sus efectos negativos.



2.4. Estaciones meteorológicas

En el control de la descarga de contaminantes del aire en la atmósfera se requieren datos sobre las variables meteorológicas para comprender el transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos al aire. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizan equipos llamados estaciones meteorológicas, que permiten la medición precisa de estas variables.

Las variables meteorológicas pueden dividirse en dos grupos: aquellas obtenidas mediante mediciones directas, como la temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar, precipitación, presión barométrica y humedad relativa, y aquellas que se obtienen mediante cálculos a partir de las anteriores, como la evapotranspiración, punto de rocío, humectación de hoja, grados días de crecimiento y temperatura aparente.

2.4.1. Estaciones meteorológicas portátiles

Las estaciones meteorológicas son equipos ampliamente utilizados debido a su facilidad de instalación, rapidez de medición y bajo costo. Estas estaciones cuentan con características como la facilidad de realizar mediciones y observaciones in situ, observaciones por sensores remotos, exactitud y capacidad de almacenamiento limitada, mantenimiento y operación económica, requerimiento de pocos operadores, cobertura moderada y baja inversión inicial.

2.4.2. Estaciones meteorológicas estacionarias

Las estaciones meteorológicas estacionarias son equipos de alta calidad que se utilizan para recolectar datos meteorológicos a nivel nacional y que generalmente forman parte de extensas redes meteorológicas. Algunas de las características de este



tipo de equipos son una alta inversión inicial, mano de obra especializada, amplia cobertura, alta exactitud, altos costos de mantenimiento y operación especializada.

2.4.3. Sensores de estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas están compuestas de sensores que recogen datos de cada una de las variables meteorológicas. Los sensores son dispositivos que permiten capturar magnitudes físicas como variaciones de la luz, la temperatura, la velocidad del viento, entre otras, o cualquier otra alteración de su entorno. Algunos de los principales sensores que se utilizan en las estaciones meteorológicas son el sensor de velocidad del viento, el sensor de dirección del viento, el sensor de temperatura, el sensor de radiación solar, el sensor de precipitación, el sensor de presión barométrica y el sensor de humedad relativa.

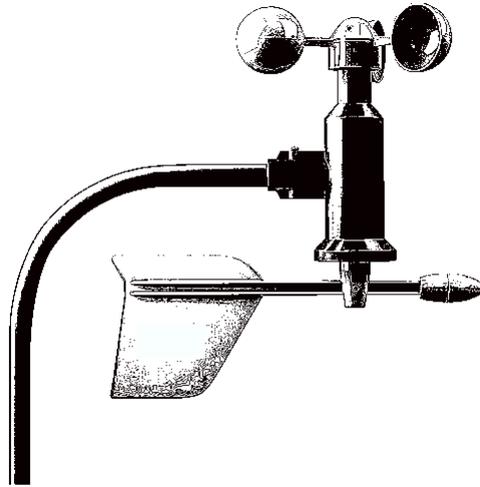
a) Sensor de velocidad de viento – anemómetro

Este tipo de sensores está compuesto por dos partes principales, denominadas el sensor y el transductor. El primero es aquel que gira por acción de la fuerza del viento y está unido a un transductor, que es el encargado de generar la señal que se grabará.



Figura 2-3

Anemómetro



b) Sensor de dirección de viento

Este tipo de sensores permite determinar la dirección desde la cual proviene el viento. Los sensores más comúnmente utilizados son las paletas de viento o veletas.

Figura 2-4

Sensor de dirección del viento



c) Sensor de temperatura

La medición de la temperatura ambiente en una estación meteorológica se realiza mediante sensores basados en la expansión térmica de un material, sensores de cambio de resistencia o sensores basados en las propiedades termoeléctricas de diversos materiales o sustancias en función de la temperatura.

El detector de temperatura por resistencia es aquel que opera sobre la base del aumento lineal de resistencia de ciertos materiales, en especial metales, como una determinada función de la temperatura. Un sensor que se utiliza frecuentemente en este tipo de equipos es el termistor, que es una mezcla de óxidos metálicos que experimentan cambios de resistencia con la temperatura mayores que los detectores de temperatura por resistencia, pero no de forma lineal. Este tipo de sensor se suele usar en conjunto con dos o más dispositivos fijados en las estaciones meteorológicas, lo que permite obtener respuestas aproximadamente lineales en un rango específico de temperatura. Otro tipo de sensor utilizado en las estaciones meteorológicas son los denominados termoeléctricos, que se basan en la diferencia de potencial entre dos metales diferentes y que dependen de la temperatura. Estos sensores se conocen como termopares.

d) Sensor de radiación solar

El piranómetro es el sensor tradicional utilizado en las estaciones meteorológicas para la medición de la radiación solar. Este sensor se compone de un pequeño disco plano con secciones de color blanco y negro. Cuando es expuesto a la radiación solar, la diferencia de temperatura entre las secciones blancas y negras produce una diferencia de potencial que es procesada y presenta la medición respectiva. En la actualidad, se utilizan celdas solares, las cuales, en presencia de la radiación solar, generan una determinada cantidad de voltaje que depende de la cantidad de radiación que reciben.

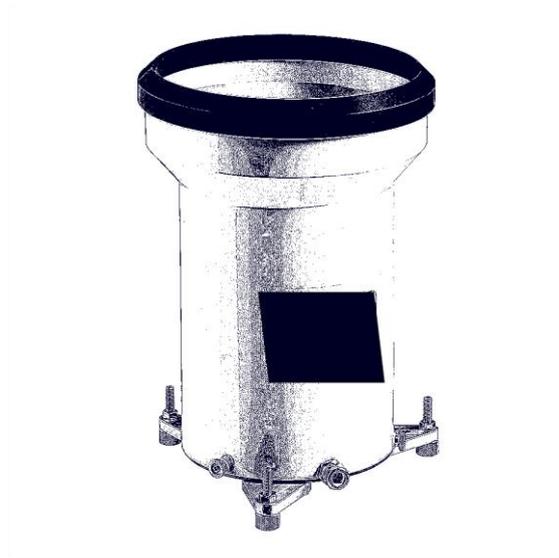


e) Sensor de precipitación

La medición de la precipitación se realiza mediante el equipo llamado pluviómetro, que es uno de los pocos instrumentos que no ha sufrido cambios desde su creación. Este sensor utiliza el método de funcionamiento de cazoletas basculantes.

Figura 2-5

Sensor de precipitación



La operación del pluviómetro se basa en un embudo superior donde se recoge el agua de la lluvia. La primera cazoleta báscula después de recoger una determinada cantidad de agua, genera un cierre momentáneo de un relé. La segunda cazoleta se posiciona para proceder a la recolección del agua del embudo y una vez que se ha alcanzado el aforo, las dos cazoletas basculan en sentido contrario, produciéndose un nuevo contacto de relé y repitiéndose el ciclo (Werner & Mainwaring, 2011).

f) Sensor de presión barométrica

Los sensores de presión barométricas tienen en su diseño un transductor de estado sólido y dispositivos para linealizar y amplificar la señal. Estos dispositivos transforman la presión atmosférica absoluta en un voltaje proporcional y lineal. (Werner & Mainwaring, 2011)

g) Sensor de humedad relativa

Este tipo de sensor está basado en el cambio de las propiedades de un capacitador polimérico de película delgada de una micra de espesor. Esta película absorbe las moléculas de agua a través de un electrodo metálico delgado, causando una variación en la capacitancia proporcional a la humedad relativa (Werner & Mainwaring, 2011).

CAPÍTULO 3

Monitoreo de la contaminación
del aire

CAPÍTULO 3 MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

3

El capítulo se centra en el monitoreo de la contaminación del aire, un aspecto crucial para entender y controlar los niveles de contaminación en el ambiente. En primer lugar, se describen los diferentes métodos de análisis de la contaminación atmosférica y los diferentes tipos de monitoreo de contaminación atmosférica. En segundo lugar, se describen los diferentes equipos de muestreo de emisiones, como los analizadores semicontinuos, los equipos de monitoreo continuo de emisiones (CEMS), los analizadores de gases y los equipos de medición de emisiones vehiculares. En tercer lugar, se discute la medición de la calidad del aire (inmisión) y se describen los diferentes equipos de muestreo pasivos, activos, activos-híbridos, analizadores automáticos, sensores remotos y bioindicadores. En cuarto lugar, se describen las redes de monitoreo de la calidad del aire, incluyendo las estrategias y objetivos del monitoreo, las escalas de monitoreo y otros aspectos importantes a tener en cuenta para la operación de una red de monitoreo, como la descripción del sitio de la fuente, el programa de muestreo, la descripción del sitio y del equipo de toma de muestra, los requerimientos del sitio de muestreo, las sondas de muestreo, la ubicación de la sonda, el control del ambiente de muestreo, la selección de equipos y técnicas de análisis, el análisis de la información y la información adicional. En quinto lugar, se describen los métodos de referencia de muestreo y el muestreo isocinético de emisiones atmosféricas, incluyendo el método 1 para la selección de puntos de muestreo, el método 2 para la determinación de la velocidad y caudal con Pitot Tipo "S", método 3 para el cálculo de la masa molar en base seca, el método 4 para la determinación de la humedad y el método 5 para la determinación del material particulado.



3.1. Métodos de análisis de la contaminación atmosférica

Dentro de los contaminantes que se encuentran normados en la legislación aplicable a la fecha en que se finalizó este libro, se incluyen el dióxido de carbono (CO_2), el oxígeno (O_2), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO_2) y el material particulado (PM). Es importante destacar que los óxidos de nitrógeno se refieren a la suma algebraica de las concentraciones de monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). Todos estos compuestos contaminantes son relevantes para la calidad del aire. En cuanto a las emisiones de fuentes fijas, además de los mencionados en relación con la calidad del aire, también están normados los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Code of Federal Regulations, 2022).

Las técnicas de análisis de los contaminantes atmosféricos son básicamente de dos tipos: las continuas y las de referencia. Las técnicas continuas, llamadas CEMS (Continuous Emission Monitoring System), han tenido un desarrollo muy avanzado en la última década; no obstante, son muy pocas las que se encuentran validadas contra los métodos de referencia. Las técnicas de referencia se basan en la utilización de métodos clásicos en su mayoría, como la gravimetría y la volumetría. Mientras que otras técnicas más complejas y refinadas utilizan métodos instrumentales, tal como la espectrofotometría de luz visible o infrarroja, así como, la quimioluminiscencia y la fluorescencia.

Los métodos gravimétricos son utilizados específicamente para la realización de determinaciones de humedad y material particulado. En cambio, los métodos volumétricos están destinados para la determinación de dióxido de carbono, oxígeno, humedad, dióxido/trióxido de azufre y el sulfuro de hidrógeno. Los métodos instrumentales son utilizados principalmente para la determinación de contaminantes en función del tipo de método (Code of Federal Regulations, 2022).



La espectrofotometría permite la determinación de óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de azufre. La fluorescencia ultravioleta visible permite la determinación del dióxido de azufre. La cromatografía gaseosa permite la determinación del monóxido de carbono, la cromatografía líquida permite los óxidos de nitrógeno, la quimioluminiscencia en cambio permite la determinación de los óxidos de nitrógeno.

En la mayoría de los casos, los métodos de referencia requerirán de la toma de muestras para posteriormente ser llevadas hacia el laboratorio y ser analizadas. Mientras que, en los métodos CEMS, la medición de los contaminantes es directa y en la mayoría de los casos es en tiempo real. Nuestra legislación nacional se encuentra basada en los métodos de referencia que han sido promulgados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Code of Federal Regulations, 2022).

El monitoreo de los contaminantes atmosféricos de fuentes fijas está realizado por dos tipos de equipos. El primero está basado en celdas electroquímicas, es decir, en dispositivos que obtienen una diferencia de potencial al contacto con el gas contaminante de interés. El segundo se realiza mediante la obtención de muestras, específicamente mediante un muestreo isocinético, para tomar las muestras de material particulado e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

3.2. Tipos de monitoreo de contaminación atmosférica

Para realizar el monitoreo de la contaminación del aire se debe entender en primer lugar el objetivo para el cual se va a realizar el mismo. Distinguiéndose entre la medición de emisiones, la medición de la calidad del aire (inmisión) o la medición de la calidad del aire ocupacional.

Dependiendo del tipo de monitoreo a realizar, se determinarán las técnicas y equipos a utilizar. Aunque muchos de los equipos utilizados pueden emplear las



mismas técnicas de medición, estos difieren en su sensibilidad. Este es el caso, por ejemplo, entre las mediciones realizadas para determinar las emisiones de contaminantes atmosféricos de las chimeneas industriales y la medición de la calidad del aire ocupacional. En estos casos, se utilizan sensores electroquímicos, pero su diferencia radica en su sensibilidad. Además, para la medición de emisiones atmosféricas se utilizan sondas que soporten altas temperaturas y que no expongan directamente los sensores a las emisiones. Esto no es el caso de los sensores electroquímicos utilizados para la calidad del aire ocupacional, que se utilizan sin sonda alguna y que permiten que el aire ingrese directamente a los sensores.

3.3. Equipos de muestreo de emisiones

Dependiendo de las emisiones a ser muestreadas, se utilizará el equipo correspondiente para tal efecto, de acuerdo con la legislación nacional vigente. Los muestreos se realizan en períodos cortos, en los que se recolecta una muestra representativa de las emisiones y se analiza. En general, la tecnología utilizada para realizar este tipo de muestreo es el muestreador isocinético. Esta técnica suele utilizarse para determinar la concentración de partículas, pero con ligeras adaptaciones a este equipo, se puede utilizar el mismo principio para determinar un espectro más amplio de contaminantes.

3.3.1. Analizadores semicontinuos

Los analizadores semicontinuos permiten determinar las concentraciones de emisiones contaminantes en ductos o chimeneas en tiempo real. Este tipo de equipos se ha popularizado al igual que los muestreadores isocinéticos para la presentación de tasas de emisión para gases de combustión.

Estos equipos poseen características tales como: son equipos que poseen sensores electroquímicos, presentación de resultados en tiempo real, no están



diseñados para realizar trabajo continuo y la mayoría de los modelos comerciales solo necesitan ser calibrados o en su defecto reemplazar el sensor correspondiente.

3.3.2. Equipos de monitoreo continuo de emisiones (CEMS)

Los equipos denominados CEMS por sus siglas en inglés Continuous Emissions Monitoring Systems, son sistemas para el monitoreo de emisiones en línea con una duración de períodos cortos. Estos equipos monitorean y almacenan las emisiones medidas durante el tiempo de funcionamiento del equipo, presentando los resultados en tiempo real, además, deben ser calibrados con patrones de calibración. Entendiéndose como un *patrón de calibración* a un gas preparado en laboratorio que contenga una concentración constante conocida de un contaminante determinado (Code of Federal Regulations, 2022).

a) Trayectoria in situ

La medición de la muestra es medida directamente en el sitio de muestreo. Este tipo de sistemas poseen generalmente analizadores montados directamente en la corriente de gas o también pueden estar localizados remotamente mediante acoplamiento entre el analizador y los lentes montados entre la corriente del gas, con un rayo de luz que monitorea el 90% o más del diámetro de la corriente del gas (Jahnke, 2000).

b) Punto in situ

Este tipo de equipos utilizan el diseño con sonda, donde la muestra se mide en su lugar, pero el rayo de luz monitorea menos del 90% del diámetro de la corriente del gas (Jahnke, 2000).



c) Sistemas extractivos

En este tipo de sistemas la muestra se remueve de la corriente del gas y es transportada al analizador, el mismo que se encuentra a nivel del suelo, dentro de una instalación cercana o generalmente instalados en una cabina equipada apropiadamente (Jahnke, 2000).

d) Ex situ

Este tipo de sistemas miden la muestra en un bypass externo al proceso general.

3.3.2.1. Analizadores usados en los CEMS

Los equipos analizadores utilizados en los CEMS son automáticos y en su mayoría son analizadores por absorción y ópticos.

Los analizadores de absorción permiten obtener mediciones de longitud de onda entre 2 y 5,3 μm , permitiendo monitorear gases tales como: amoníaco (NH_3), monóxido de nitrógeno (NO), monóxido de di nitrógeno (N_2O), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), ácido clorhídrico (HCl), agua (H_2O), compuestos alifáticos como hidrocarburos saturados, tal como metano, etano, propano entre otros (Werner & Mainwaring, 2011).

Los analizadores ópticos utilizan tecnología infrarroja dispersiva (NDIR por sus siglas en inglés), teniendo ventajas sobre los anteriores, por permitir obtener resultados sin toma de muestras, debido a que su configuración no utiliza partes que entren en contacto con la muestra, permitiendo incrementar la velocidad de medición y eliminando la posibilidad de pérdidas de muestras.



Los limitantes de los analizadores ópticos, específicamente los NDIR, son entre otras, la temperatura hasta la que pueden operar, que es de 500 °C; permitiendo operarse en temperaturas menores a los 100 a 200 °C, siempre y cuando no exista la presencia de gotas de agua. Con respecto a la presión atmosférica, si esta es mayor a 5 in H₂O o menor a 3 in H₂O se requiere de una purga especial de aire. El diámetro de la chimenea o ducto debe estar entre 1 a 4 m preferiblemente y de 0,6 a 10 m. La carga de material particulado ideal es menor a 100 mg/m³, pero en cargas inferiores a los 250 mg/m³ es aceptable para diámetros menores a 2 m. Uno de los principales problemas que pueden tener este tipo de equipos es cuando dentro de la corriente de gas se encuentra la presencia de gotas de agua, debido a que las mismas dispersan la luz, limitando las mediciones de la luz infrarroja. Finalmente, los rangos de medición dependerán de la longitud de la trayectoria; cuanto más larga sea esta, menor será el rango de medición posible (Jahnke, 2000).

3.3.3. Analizadores de gases

El principio de este tipo de equipos es el utilizar las propiedades físicas o químicas del gas a ser detectado, mediante la utilización de sensores electroquímicos y ópticos que generan una diferencia de potencial, que posteriormente son procesados por componentes electrónicos para dar como resultado una señal electrónica que presenta la concentración del gas de interés en una pantalla en tiempo real. Este tipo de equipos poseen microprocesadores incorporados, lo que permite entregar resultados finales después de haber pasado por procesos complejos de cálculo matemático. Estos equipos tienen la capacidad de analizar en tiempo real una gran variedad de gases de interés, en función de la cantidad de sensores electroquímicos u ópticos que puedan integrar. De esta manera, se puede formar una estación de monitoreo completa y eficiente.



3.3.4. Muestro isocinético

Las razones por las que se utiliza el muestreo isocinético entre otros son porque es un método de referencia. Desde un punto técnico, se puede manifestar que, en una corriente gaseosa de una chimenea, los gases viajan en un régimen que puede ser turbulento o laminar dependiendo de varias condiciones. Suponiendo que las condiciones son laminares, las partículas que viajan en el centro de la sección del ducto de la chimenea tienen la máxima velocidad y en los bordes la velocidad es mínima. Es aquí donde se plantea la pregunta: ¿a qué velocidad se debe extraer la muestra? (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

Se analizarán tres casos de la velocidad a la cual se debe extraer la muestra. El primer caso se da cuando se aspira la muestra a mayor velocidad que la velocidad del gas en la chimenea. Las partículas que viajan en los alrededores de la boquilla de muestreo no desviarán su trayectoria para mantenerse dentro del dispositivo de muestreo, por lo que se aspirará más "aire" de la corriente gaseosa y la muestra se diluirá, teniendo como resultado por defecto una menor concentración de material particulado.

En un segundo caso, al obtener la muestra aspirando a menor velocidad, las partículas que viajan en la dirección del dispositivo de muestreo entrarán dentro del mismo, pero se aspirará menos aire de la corriente gaseosa y la muestra se concentrará, rindiendo exceso de material particulado.

En un tercer caso, al obtener la muestra a la misma velocidad que la de la chimenea, se tendrá un muestreo representativo, y a esta condición se denomina condición isocinética. Una vez analizado el problema cuando se tiene régimen laminar, en el cual se encuentran diferentes velocidades desde las paredes de la chimenea hasta el centro, ¿cómo se realiza para muestrear si esta velocidad varía? La solución a esta pregunta es la necesidad de seleccionar una serie de puntos en la



sección del ducto de la chimenea, medir la velocidad en cada punto y en cada uno de esos puntos se tendrá la condición a alcanzar para un muestreo isocinético (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

Este análisis se basa en la determinación para material particulado, pero no se puede considerar lo mismo para el caso de contaminantes gaseosos como el dióxido de azufre, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, esto debido a que estos gases se distribuyen homogéneamente en la corriente gaseosa, en función de que no tienen masa, en cambio las partículas discretas son arrastradas por el flujo de gases calientes. Por lo tanto, se puede concluir que para determinar este tipo de contaminantes no es necesario muestrear en modo isocinético (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

El muestreo isocinético es requerido para el muestreo de contaminantes que se asocian a partículas sólidas o líquidas, como los metales, compuestos semi volátiles como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, pesticidas, nieblas de ácido sulfúrico, dioxinas y furanos, entre otros.

3.3.5. Equipos de medición de emisiones vehiculares

Son equipos analizadores de gases en tiempo real, donde, las mediciones son realizadas de forma estática y/o con pruebas dinámicas, en fuentes de tipo móviles.

3.4. Medición de la calidad del aire (Inmisión)

Las mediciones de la calidad del aire se lo realizan mediante la utilización de los siguientes equipos y procedimientos: equipos de muestreo pasivo, equipos de muestreo activo, equipos de muestreo activos-híbridos, analizadores automáticos, sensores remotos y bioindicadores.



3.4.1. Equipos de muestreo pasivos

El principio empleado en los equipos de muestro pasivo es la absorción y adsorción de la inmisión en estudio en un sustrato químico específico, que posteriormente se lleva a un laboratorio para la determinación de la concentración del contaminante específico. Este tipo de muestreo se utiliza para determinar la concentración promedio de la sustancia en estudio desde una hora determinada hasta un mes de exposición.

La ventaja de la utilización de este tipo de equipos es su economía, simplicidad y la posibilidad de poder combinar este tipo de muestreos con otras técnicas de monitoreo como los analizadores continuos.

Dentro de las características más sobresalientes de los equipos de muestreo pasivos se encuentra su metodología económica y práctica, que se basa en la difusión de contaminantes en el aire hacia un medio de absorción. Las muestras se recolectan en períodos definidos de tiempo, generalmente comprendiendo de una semana a un mes. El reducido costo de los equipos permite escalar a un gran número de unidades, y como son sistemas pasivos, no se necesita fuente eléctrica. Estos equipos se utilizan generalmente para determinar contaminantes urbanos como dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), amoniaco (NH_3), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y ozono (O_3). Es importante distinguir entre el monitoreo pasivo de calidad de aire y el monitoreo de exposición ocupacional (Code of Federal Regulations, 2022).

3.4.2. Equipos de muestreo activos

Este tipo de equipos de muestreo se diferencian de los pasivos en que requieren energía eléctrica para su funcionamiento, debido a la utilización de bombas de succión en su sistema. Esta propiedad es la que da el nombre "activos" a estos



equipos. Al igual que los equipos de muestreo pasivos, estos requieren un análisis de laboratorio posterior para determinar la concentración del contaminante específico en estudio.

Los equipos más utilizados en esta categoría son los equipos de alto volumen denominados Hi-Vol para material particulado y el sistema de burbujeadores acidimétricos para otros contaminantes. La recolección de muestras se realiza mediante métodos físicos o químicos para su posterior análisis en laboratorio. Estos muestreadores recolectan un volumen de aire, que es bombeado a través de un colector por un período de tiempo determinado. Estos equipos requieren una planificación logística diaria para su funcionamiento.

3.4.3. Equipos de muestreo activos-híbridos

Estos equipos tienen características similares a los equipos de muestreo activos, pero su configuración incluye sistemas electrónicos para mejorar la calidad de las mediciones y reducir la incertidumbre. Estos equipos solo recolectan la muestra, y es necesario llevarlas a un laboratorio para determinar la concentración del contaminante objeto de estudio. Su sistema incluye sensores de flujo másico, temperatura y presión ambiente, además de instrumentos de control de flujo que pueden ser ajustados por el usuario (entre 5 y 18 l/min). También tiene la capacidad de ser conectado con diferentes unidades satélites para realizar muestreos simultáneos controlados por una unidad principal. Su configuración incluye microprocesadores para programar el muestreo y almacenar los datos en estado de operación. Por lo general, tiene una interfaz RS-232 y/o USB para adquirir variables atmosféricas y de flujo. También puede tener la capacidad de cambiar automáticamente los filtros para realizar muestreos durante varios días, y su configuración puede ser modificada de manera sencilla para medir partículas suspendidas totales (TSP), material particulado de 10 μm , 2,5 μm y 1 μm (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y PM_1).



3.4.4. Analizadores automáticos

Los analizadores automáticos están compuestos por sistemas opto eléctricos, que combinan elementos ópticos con electrónica y tienen un comportamiento específico según las características físicas y químicas de un gas. Una desventaja notable de este tipo de equipos es que necesitan ser colocados en cabinas con condiciones controladas de humedad y temperatura para funcionar correctamente. La realización de mediciones y la obtención de resultados son en tiempo real, y permiten mediciones puntuales con alta resolución.

Las técnicas opto eléctricas como la absorción UV o IRND, la fluorescencia o la quimioluminiscencia permiten analizar en línea los contaminantes contenidos en el aire. Sin embargo, esta técnica tiene un alto costo debido a la logística y el mantenimiento necesarios para estos equipos. Además, necesitan utilizar gases patrón constantemente para su calibración. Los analizadores automáticos pueden realizar mediciones de gases y partículas.

3.4.5. Sensores remotos

Los sensores de espectroscopía utilizan técnicas espectroscópicas, obteniendo datos a partir de la integración en el camino entre un emisor de luz y un receptor, o entre un emisor, un espejo y un receptor. Esto permite realizar mediciones de contaminantes en un punto determinado del espacio, que pueden ser integradas en componentes múltiples a lo largo de la trayectoria, que normalmente es mayor a 100 m. Una desventaja importante de este tipo de técnicas es su elevado costo y complejidad. La tecnología más utilizada y conocida es la Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), y en muchos casos también se utiliza la tecnología Light Detection And Ranking (LIDAR).



3.4.6. Bioindicadores

Los efectos de la contaminación atmosférica pueden ser estudiados mediante la utilización de plantas y/o animales, midiendo los cambios en la apariencia principalmente en plantas, así como el estudio de la bioacumulación en su estructura interna, observando cambios en su distribución o cambios en su metabolismo, siendo estos análisis de tipo cuantitativos o cualitativos, para lo que se necesita la asistencia de laboratorios especializados. La principal desventaja de esta técnica es el ser muy específico para cada región, por lo que su uso no se lo puede generalizar.

3.5. Redes de monitoreo de la calidad del aire

Las redes de monitoreo son conjuntos de estaciones de muestreo que cubren totalmente la extensión del área determinada, de acuerdo con los objetivos de monitoreo de parámetros ambientales. Las redes de monitoreo se definen en etapas como: las estrategias de monitoreo y los objetivos de monitoreo.

a) Estrategias del monitoreo

Previo a la operación de la red de monitoreo, se debe establecer: la definición de objetivos del monitoreo, identificar los parámetros ambientales que se necesita estudiar, definir el número y sitios de monitoreo, determinar los tiempos de muestreo necesarios e identificar y seleccionar los equipos de muestreo, así como, las técnicas de análisis.

b) Objetivos del monitoreo

En nuestro país, por lo general, los objetivos de monitoreo están definidos en función del cumplimiento de la normativa legal de calidad del aire, seguido de la utilización de este tipo de monitoreo para determinar la efectividad de las medidas de



control implantadas. En un porcentaje menor, el monitoreo se utiliza para evaluar el riesgo para la salud humana y el ambiente, así como para investigar quejas a la autoridad competente. En otros países donde la normativa técnica es más avanzada, el monitoreo de calidad del aire sirve para validar modelos de calidad del aire, observar tendencias a mediano y largo plazo, y obtener información que sirva de base para la planificación del uso del suelo. Sin embargo, en nuestro país, estos aspectos no se tienen en cuenta para la ubicación de parques industriales, y su implementación se basa principalmente en la aprobación del estudio de impacto ambiental por parte de la autoridad ambiental competente.

Otros objetivos específicos pueden ser la detección de las concentraciones máximas de contaminantes en el área cubierta por la red de monitoreo, identificar las concentraciones representativas en áreas pobladas de alta densidad poblacional, determinar los niveles de concentración base o background, y determinar todas las afectaciones sobre los pobladores y bienes en zonas rurales y remotas. Dentro de todos estos estudios, se deben cuantificar la calidad del aire y sus variaciones en tiempo y espacio, realizar las comparaciones necesarias con otros sistemas de monitoreo, y determinar las relaciones entre fuente y receptor.

3.5.1. Escalas de monitoreo

Para diseñar una red de monitoreo, es crucial tener un conocimiento profundo de las diferentes escalas de monitoreo existentes, siendo las más comunes las siguientes:

- **Microescala:** se refiere a las concentraciones de volúmenes de aire en áreas de algunos metros hasta 100 metros.
- **Escala media:** abarca las concentraciones de áreas que normalmente tienen dimensiones entre 100 metros y 0,5 kilómetros.



- **Escala local:** define las concentraciones en un área de 0,5 a 4 kilómetros con un uso de suelo relativamente uniforme.
- **Escala urbana:** se refiere a las condiciones de una ciudad con dimensiones que varían entre 4 y 50 kilómetros.
- **Escala regional:** se define por un área rural homogénea que se extiende desde decenas hasta cientos de kilómetros.
- **Escala nacional y global:** se refiere a las condiciones de toda una nación o del mundo como un sistema completo.

Cada una de estas escalas tiene características y requisitos específicos que deben ser considerados al diseñar una red de monitoreo para garantizar una cobertura adecuada y una interpretación precisa de los datos recopilados. Es importante tener en cuenta estas escalas al establecer los objetivos y la estrategia de monitoreo.

3.5.2. Otros aspectos para tener en consideración para la operación de una red de monitoreo

Para llevar a cabo la operación de una red de monitoreo, se deben tener en cuenta aspectos como la descripción del sitio de la fuente, la descripción del programa de muestreo, la descripción del sitio y del equipo de muestreo, los requerimientos del sitio de muestreo, las sondas de muestreo, la ubicación de la sonda, el control del ambiente de muestreo, la selección de equipos y técnicas de análisis, el análisis de la información, la información adicional, los datos de emisión, los datos de transporte y los datos de inmisión (incidencia).

a) Descripción del sitio de la fuente

En esta fase, se describirá e incluirá la topografía de la zona en por lo menos un radio de 2 km, identificando el uso del suelo, fuentes cercanas y una descripción de las condiciones reinantes en la zona, centrándonos con mayor detenimiento y detalle en el comportamiento del viento.



b) Descripción del programa de muestreo

Una vez que se ha identificado el sitio de muestreo, se establece el período en el que se realizará el muestreo, indicando los criterios de selección de los sitios de muestreo, así como la justificación del número total de muestras y si el muestreo se realizará de forma continua o intermitente.

Para la realización de un muestreo continuo, se utilizan métodos ópticos eléctricos y analizadores continuos, mientras que, para los muestreos intermitentes, se deben determinar los puntos de muestreo mediante la utilización de pruebas de variabilidad. Como sugerencia, por experiencia, se puede estimar la confiabilidad de la información obtenida mediante la utilización de métodos estadísticos o específicamente mediante el teorema de Nyquist. La determinación de la variabilidad nos permitirá determinar el número de muestras y los sitios de muestreo que nos permitan conocer las condiciones reales de la contaminación en el área objeto de estudio.

La duración de este tipo de muestreo suele planificarse para un tiempo de un año. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA) recomienda un periodo válido de cuatro meses, determinando los meses en los que, según los muestreos anteriores, se han registrado las concentraciones más elevadas. La U.S. EPA hace una consideración especial para el ozono, estableciendo que los cuatro meses deben ser los meses más calurosos y que deben incluir los meses en los que se han presentado las mayores concentraciones según los monitoreos realizados anteriormente.

c) Descripción del sitio y del equipo de toma de muestra

En esta fase deben ser incluidas las coordenadas, las alturas de las sondas respecto al nivel del suelo, se procura describir todas las obstrucciones presentes en



la zona, distancias a caminos más cercanos y descripción de la existencia o no de otras fuentes en la zona.

En cuanto a los equipos utilizados, es necesario especificar el nombre del fabricante, los procedimientos utilizados para la calibración y la descripción general del equipo. Además, en nuestro país, la norma legal ambiental determina que los métodos de ensayo deben ser acreditados en función de la normativa ISO/IEC 17025, norma que se encuentra en constante revisión y actualización, por lo que cada cierto período de tiempo se emite una nueva versión de esta. Sin embargo, los principios generales en los que se basa no cambian, ya que es una norma técnica.

d) Requerimientos del sitio de muestreo

Para evaluar una inmisión es necesario contar con un punto de muestreo, que corresponde a una pequeña área continua en la que realizar más subdivisiones ya no contribuye a un mejor resultado y se vuelve innecesario. El mejor punto de muestreo es aquel donde la concentración de las emisiones del contaminante en estudio es mayor. Para establecer una mayor precisión en las tendencias de concentraciones del contaminante objeto de estudio, es necesario la utilización de varias estaciones de monitoreo.

La definición de un punto de muestreo debe tomar en cuenta que sea de fácil acceso, contar con adecuada infraestructura, carecer de obstáculos, proporcionar datos comparables con las demás estaciones, tener adecuado funcionamiento y utilidad al menos durante todo el período del estudio, tener accesibilidad permanente, contar con energía eléctrica segura, estar fuera del alcance de actos de vandalismo y tener condiciones para resistir condiciones extremas de temperatura.



e) Sondas de muestreo

Es preferible construir las sondas de muestreo en vidrio o teflón, ya que la principal característica del material de una sonda es no ser reactivo y no interferir con el contaminante objeto de estudio. La permanencia de la muestra dentro de la sonda debe ser el tiempo mínimo, por lo que es importante seleccionar la sonda más corta posible. El diseño en forma de "U" es una de las sondas óptimas, ya que evita la entrada de agua lluvia y la acumulación de suciedad. Los diseños de las sondas se caracterizan por ser fáciles de manipular y de instalar, permitiendo realizar actividades de limpieza y mantenimiento de manera ordenada.

f) Ubicación de la sonda

La sonda debe colocarse de manera que se obtenga la concentración máxima, evitando errores por la colocación demasiado cerca o directamente en el contaminante. La ubicación de la sonda dependerá del contaminante que se quiera estudiar o analizar y esto estará en función del método a ser utilizado.

La sonda generalmente se ubica a tres metros del nivel del suelo, aunque esto no siempre es la ubicación más adecuada. A veces, el técnico o investigador desea determinar la concentración del contaminante a la altura normal de respiración, que es aproximadamente a dos metros de altura desde el nivel del suelo. Además, la sonda también se coloca a diferentes niveles para poder determinar con precisión la concentración de los contaminantes en sitios donde hay una gran cantidad de edificaciones.

g) Control del ambiente de muestreo

Es necesario realizar uno de los principales controles para determinar que los equipos de muestreo se encuentran cumpliendo el método, que es el control de la



temperatura y, en general, las condiciones físicas bajo las cuales el equipo se encuentra en funcionamiento. Esta tarea es de vital importancia, ya que factores como la humedad, la vibración, el polvo entre otros. pueden influir en la exactitud de las medidas realizadas y también pueden afectar la vida de servicio de los componentes electrónicos y ópticos contenidos en la mayor parte de los analizadores. Estos factores, en su mayoría, son controlados mediante la utilización de casetas cerradas donde se colocan los equipos de muestreo, dejando expuesta solo la sonda encargada de captar la muestra al aire libre.

h) Selección de equipos y técnicas de análisis

Una de las fases primordiales dentro del muestreo de calidad del aire corresponde a la selección de equipos y técnicas de análisis. Para ello, se deben tener en cuenta la base de datos a ser utilizada con una evaluación de su calidad y precisión, la capacidad económica, la capacitación del personal encargado de realizar la toma de muestras y el análisis del mantenimiento. Además, se deben revisar el costo y la complejidad del equipo, así como el correcto funcionamiento y procedimiento de calibración. Cada fabricante debe suministrar procedimientos específicos para la realización de actividades de mantenimiento.

Para los analizadores automáticos, se deben realizar las comprobaciones necesarias en cero y, si es necesario, realizar la recalibración del equipo. En la actualidad, la mayoría de los equipos permiten registrar y descargar de forma continua los resultados en un computador para evitar la pérdida de esta información y la detección temprana de fallas en los equipos de muestreo.

i) Análisis de la información

Es aconsejable determinar el promedio diario de las concentraciones de los contaminantes, así como las variaciones diurnas en las concentraciones de los



contaminantes en estudio. También es conveniente determinar la distribución de frecuencia, lo que permitirá determinar la relación entre los valores obtenidos de una característica y la frecuencia absoluta o relativa de su ocurrencia, que puede ser representada como frecuencias reales, relativas o acumulativas, en una tabla o un gráfico. Además, es aconsejable determinar los valores máximos por hora, día y mes de la concentración de los contaminantes en estudio.

j) Información adicional

Además de todo lo que se ha mencionado en los párrafos anteriores, en esta sección es necesario tener en cuenta toda la información técnica disponible antes de iniciar los monitores, como información sobre equipos, sitio de muestreo, reglamentos legales aplicables entre otros. Esto permitirá plantear de manera más efectiva los objetivos de muestreo.

k) Datos de emisión

El cálculo de las emisiones se basa en las condiciones de operación de la planta, el inventario de las materias primas utilizadas en el proceso de producción, el inventario de los equipos utilizados y sus características, y el tamaño y ubicación geográfica de la fuente a estudiar.

l) Datos de transporte

Es necesario disponer de información climatológica a largo plazo para determinar las condiciones de transmisión, así como informes sobre la geomorfología del área de estudio, estimaciones e información sobre emisiones secundarias e informes de modelos matemáticos.



m) Datos de inmisión (incidencia)

La información disponible sobre la inmisión de resultados de medidas realizadas en el mismo sitio o bajo condiciones similares en el pasado puede servir como referencia para el contaminante objeto de estudio. Esta información se obtiene mediante mediciones realizadas a intervalos de tiempo previamente establecidos.

3.6. Métodos de referencia de muestreo

La normativa nacional ambiental está redactada con base en a la normativa técnico legal de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA), que ha realizado estudios sobre la medición de contaminantes emitidos a la atmósfera durante varias décadas, publicando sus resultados de estas investigaciones y que han sido organizados en métodos que sirven de referencia para la mayoría de los parámetros de interés.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) utiliza diversos métodos de prueba para evaluar las emisiones y garantizar la calidad del aire y la conformidad con las normativas aplicables. Estos métodos de prueba se pueden clasificar en las siguientes categorías:

Métodos de prueba promulgados

Son aquellos propuestos o promulgados en el Registro Federal y codificados en el Código de Regulaciones Federales (CFR) (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Métodos de prueba propuestos

Estos métodos han sido publicados en el Registro Federal como propuestas de reglamentación, pero aún no han sido promulgados. Pueden ser nuevos métodos o



revisiones a los Métodos del Registro Federal existentes. Al promulgarse, se convierten en el Método oficial del CFR (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Métodos alternativos aprobados

Estos métodos pueden ser utilizados por las fuentes para determinar el cumplimiento de los requisitos de las partes aplicables sin necesidad de una aprobación adicional de la EPA. El Administrador, o su designado, ha aprobado estos métodos para las aplicaciones específicas; esta aprobación ha sido documentada a través de una carta oficial de la EPA. Estos métodos incluyen procedimientos de control y aseguramiento de la calidad que deben cumplirse. El personal de la EPA puede no ser necesariamente el experto técnico en estos métodos (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Métodos de prueba condicionales

Esta categoría incluye métodos que fueron clasificados como métodos de prueba condicionales antes de que otras categorías de métodos fueran revisadas. Debido a que algunos de estos métodos han sido citados en normas y permisos estatales bajo su designación de Método de Prueba Condicional (CTM), se ha creado una categoría para ellos llamada "Métodos Condicionales Históricos". Esta categoría está cerrada y no se agregan nuevos métodos a ella (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Otros métodos de prueba

Esta categoría incluye métodos de prueba que aún no han sido sometidos al proceso de elaboración de reglas federales. Cada uno de estos métodos, así como la documentación técnica disponible que los respalda, ha sido revisado por el personal



del Centro de Medición de Emisiones (EMC) y se ha considerado potencialmente útil para la comunidad de medición de emisiones (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En la Tabla 3-1 se presentan los métodos de monitoreo establecidos en el Anexo III publicado mediante el Acuerdo Ministerial 097A del Ministerio del Ambiente, en la Edición Especial del Registro Oficial No. 387, del 4 de noviembre de 2015, correspondiente a la "Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas", que es la norma vigente al momento de publicar esta obra.

3.6.1. Métodos de monitoreo de emisiones al aire desde fuentes fijas establecido en el Anexo III - Acuerdo Ministerial 097

En la Tabla 3-1 se presenta los métodos de monitoreo de emisiones al aire desde fuentes fijas establecido en el Anexo III - Acuerdo Ministerial 097. Los mismo que, son explicados de forma detallada más adelante en las secciones correspondientes a este capítulo.

Tabla 3-1.
Métodos de monitoreo de emisiones al aire desde fuentes fijas establecido en el Anexo III - Acuerdo Ministerial 097

Parámetros	Métodos de monitoreo discontinuo aprobados EPA	Métodos de monitoreo condicionados EPA	Sistemas de monitoreo continua (CEMS) aprobados EPA
Ubicación de puertos	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 1	NA	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 1 o Método 1a
Velocidad de salida de gases	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 2	NA	USEPA, Parte 60, apéndice B, PS 6 para CEMS
Pesos moleculares seco	USEPA, parte 60, Apéndice A, Método 3	NA	NA



Parámetros	Métodos de monitoreo discontinuo aprobados EPA	Métodos de monitoreo condicionados EPA	Sistemas de monitoreo continua (CEMS) aprobados EPA
CO ₂ y O ₂	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 3A	OTM-13, CTM-030 o CTM-034	USEPA, Parte 60, Apéndice B, PS 3 para CEMS
Humedad	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 4	NA	NA
Material particulado	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 5 o USEPA, Parte 60, apéndice A, Método 17	NA	USEPA, Parte 60, Apéndice B, PS 11 para CEMS
Dióxido de azufre	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Métodos 6C	NA	USEPA, Parte 60, Apéndice B, PS 2 para CEMS
Óxidos de nitrógeno	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Métodos 7A, 7B, 7C, 7E	OTM-13, CTM-022, CTM-030 O CTM-034	USEPA, Parte 60, Apéndice B, PS 11 para CEMS
Cd, Tl, Hg, As, Co, Se, Cr, Pb, Cu, Mn	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 29	NA	NA
Dioxinas y furanos	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 23	NA	NA
HCl - HF	USEPA, Parte 60, Apéndice A, Método 26A	OTM-22	

Nota. Adaptado de Acuerdo Ministerial 097A, 2015

3.6.2. Métodos de medición de concentraciones de contaminantes criterio del aire

En la Tabla 3-2 se presentan los métodos de medición de concentración de contaminantes criterios y la Tabla 3-3 se presenta los métodos de medición de contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o carcinogénicos del aire ambiente, establecidos en el Anexo IV publicado mediante Acuerdo Ministerial 097A del Ministerio del Ambiente, en la Edición Especial del Registro Oficial No. 387, el 4 de noviembre de 2015, correspondiente a la “Norma de calidad del aire ambiente o nivel de inmisión”, siendo esta norma la que se encuentra vigente al momento de publicar esta obra.



Tabla 3-2.*Métodos de medición de concentraciones de contaminantes criterio del aire*

Contaminante	Nombre, referencia y descripción del método
Partículas Sedimentables	<p>Nombre: Métodos Gravimétrico, mediante Captación de Partículas en Envases Abiertos</p> <p>Referencia: Method 502. Methods of Air Sampling and Analysis, 3rd. Edition, Intersociety Committee, Lewis Publishers, Inc. 1988</p> <p>Descripción: Se utilizará un envase, de 15 centímetros de diámetro o mayor, y con altura dos o tres veces el diámetro. La altura del envase, sobre el nivel del suelo, será de al menos 1,2 metros.</p> <p>Las partículas colectadas serán clasificadas en solubles e insolubles. Las partículas insolubles se determinarán mediante diferencia de peso ganado por un filtro de 47 mm, y que retenga aquellas partículas contenidas en el líquido de lavado del contenido del envase. En cambio, las partículas insolubles se determinarán mediante la diferencia de peso ganado por un crisol, en el cual se evaporará el líquido de lavado del envase. La concentración total de partículas sedimentables será la suma de partículas solubles e insolubles, normalizadas con respecto al área total de captación delo envase.</p>
Material Particulado (PM ₁₀)	<p>Nombre: Método Gravimétrico, mediante muestreador de alto caudal o de bajo caudal</p> <p>Referencia: 40 CFR Part 50, Appendix J o Appendix M</p> <p>Descripción: el equipo muestreador, de alto caudal o de bajo caudal, estará equipado con una entrada aerodinámica capaz de separar aquellas partículas de tamaño superior a 10 micrones de diámetros aerodinámico. Las partículas menores a 10 micrones serán captadas en un filtro, de alta eficiencia, y la concentración se determinará mediante el peso ganado por el filtro, dividido para el volumen total de aire muestreado en un período de 24 horas continuas cada seis días como mínimo.</p> <p>Métodos Alternos: podrán ser también utilizados los denominados métodos de medición continua, tanto del tipo micro balanza oscilante como del tipo atenuación beta. En el primer caso, el equipo muestreador, equipado con entrada aerodinámica PM₁₀, posee un transductor de masa de las oscilaciones inducidas por el material particulado. En el segundo tipo, el equipo muestreador, con entrada PM₁₀, contiene una fuente de radiación beta que determina la ganancia de peso en un filtro, a medida que este experimenta acumulación de partículas.</p>



Contaminante	Nombre, referencia y descripción del método
Material Particulado (PM _{2,5})	<p>Nombre: Método Gravimétrico, mediante muestreador de bajo caudal.</p> <p>Referencia: 40 CFR Part 50, Appendix J o Appendix L.</p> <p>Descripción: el equipo muestreador, de bajo caudal, estará equipado con una entrada aerodinámica capaz de separar aquellas partículas de tamaño superior a 2,5 micrones de diámetro aerodinámico. Las partículas menores a 2,5 micrones serán captadas en un filtro, y la concentración se determinará mediante el peso ganado por el filtro, dividido para el volumen total de aire muestreado en un período de 24 horas.</p> <p>Métodos Alternos: podrá ser también utilizados los denominados métodos de medición continua, del tipo micro balanza oscilante o del tipo atenuación beta, según se describió para material particulado PM₁₀.</p>
Dióxido de Azufre (SO ₂)	<p>Nombre: Método de la Pararosanilina: absorción en medio líquido y análisis colorimétrico posterior. Analizador Continuo por Fluorescencia.</p> <p>Referencias: Método de la Pararosanilina: 40 CFR Part 50, Appendix A.</p> <p>Fuorescencia: Diferentes fabricantes cuyos equipos se encuentren aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.</p> <p>Descripción: Método de la Pararosanilina: el dióxido de azufre es absorbido en una solución de potasio o de tetracloromercurano de sodio (TCM). La muestra es acondicionada para evitar interferencias, en particular de metales y de agentes oxidantes, como ozono y óxidos de nitrógeno. La solución es tratada con formaldehído, ácido fosfórico y pararosanilina, a fin de mantener condiciones adecuadas de pH y de color: La concentración final se determina mediante colorímetro.</p> <p>Método Fluorescencia: la concentración de dióxido de azufre es determinada mediante la medición de la señal fluorescente generada al excitar a dicho compuesto en presencia de luz ultravioleta.</p> <p>Método Alternativo: podrá ser utilizado el método pasivo referido en la Norma Europea EN 13528-1:2002, EN 13528-2:2002, EN 13528-3:2002, y deben aplicarse en conjunto en áreas sin riesgo de exceder los valores límite que fueron determinados previamente.</p>
Monóxido de Carbono (CO)	<p>Nombre: Analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR)</p> <p>Referencia: 40 CFR Part 50, Appendix C</p> <p>Descripción: el principio de medición consiste en determinar la concentración de monóxido de carbono mediante el cambio en absorción de energía infrarroja en diferentes longitudes de onda.</p>



Contaminante	Nombre, referencia y descripción del método
Ozono (O ₃)	<p>Nombre: Quimiluminiscencia Fotómetro ultravioleta</p> <p>Referencia: 40 CFR Part 50, Appendix D</p> <p>Descripción: el principio de medición, para equipos con quimioluminiscencia, es la mezcla de aire con etileno, produciendo la reacción del ozono. Esta reacción libera luz (reacción quimioluminiscencia), la cual es medida en un tubo fotomultiplicador. Para el caso de equipos con fotómetro ultravioleta, el principio de medición consiste en determinar la cantidad de luz absorbida a una longitud de onda de 254 nanómetros.</p> <p>Método alternativo: podrá ser utilizado el método pasivo referido en la Norma Europea En 13528-1:2002, EN 13528-2:2002, EN 13528-3:2002, y deben aplicarse en conjunto en áreas sin riesgo de exceder los valores límite que fueron determinados previamente.</p>
Dióxidos de Nitrógeno (NO ₂)	<p>Nombre: Quimiluminiscencia</p> <p>Referencia: 40 CFR Part 50, Appendix F</p> <p>Descripción: el NO₂ es convertido en NO, el cual reacciona con ozono introducido expresamente, produciendo luz en la reacción. El instrumento permite la presentación de resultados para concentraciones tanto de NO₂ como de NO.</p> <p>Método Alternativo: podrá ser utilizado el método pasivo referido en la Norma Europea En 13528-1:2002, En 13528-2:2002, EN 13528-3:2002, y deben aplicarse en conjunto en áreas sin riesgo de exceder los valores límite que fueron determinados previamente.</p>

Nota. Adaptado de Acuerdo Ministerial 097A, 2015

Dentro de la normativa ambiental nacional vigente determina responsabilidades para la determinación de las concentraciones de los contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o carcinogénicos del aire ambiente, para lo cual se hace referencia a los métodos, así como a los procedimientos de la legislación federal de los Estados Unidos de América en las secciones respectivas a la materia ambiental. También permite la utilización de las Directivas de la Comunidad Europea, así como la norma aplicable a la materia ambiental de la American Society for Testing and Materials o ASTM International (ASTM), las cuales se describen en la Tabla 3-3.



Tabla 3-3.

Métodos de medición de contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o carcinogénicos del aire ambiente

Contaminante no convencional	Nombre, Referencia y Descripción del método
Cadmio	<p>Nombre: Espectrometría de Absorción Atómica</p> <p>Referencia: Method IO 3.2. Determination of metals in ambient particulate matter using atomic absorption AA Spectroscopy, (EPA/625/R-96/010a)</p> <p>Descripción: El método se basa en un muestreo activo, con un muestreador de alto volumen. El análisis se realiza por absorción atómica (AA).</p>
Mercurio	<p>Nombre: Espectrometría de Absorción con horno de grafito</p> <p>Referencia: Method IO 3.2. Determination of metals in ambient particulate matter using, graphite furnace Atomic Absorption Spectroscopy (EPA/625/R)</p> <p>Descripción: El método se basa en la captura de partículas en filtros de membranas. El análisis se realiza por espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito</p>
Benceno	<p>Nombre: adsorción TENAX® y Cromatografía de gases / espectrometría de masa (GC/MS)</p> <p>Referencia: EPA-Method To-1- METHOD FOR THE DETERMINATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN AMBIENT AIR USING TENAX® ADSORPTION AND GAS CHROMATOGRAPHY/MASS SPECTROMETRY (GC/MS) (600/4-89-017)</p>

Nota. Adaptado de Acuerdo Ministerial 097A, 2015

3.6.3. Métodos de referencia aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA)

En la Tabla 3-4, se presenta un resumen para que, el lector tenga una idea clara de que método aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA) podría servirle de acuerdo con sus necesidades, el mismo que, puede consultar y profundizar el conocimiento en la fuente bibliográfica respectiva. Cabe



recalcar que, la tabla es presentada con la traducción al español de los métodos originales, los mismos que, se encuentran en idioma inglés, debiendo tomar en consideración que en dependencia de la bibliografía consultada los nombres pueden tener cambios.

Tabla 3-4.

Métodos de referencia aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA)

No. Método	Definición
Método 1	<p>Muestreo y determinación de la velocidad para fuentes estacionarias Proporcionar orientación para la selección de puertos de muestreo y puntos de trayectoria donde se realizará el muestreo de contaminantes del aire. Se presentan dos procedimientos: uno simplificado y otro alternativo. El único parámetro medido cuantitativamente en el procedimiento simplificado es la magnitud del flujo ciclónico del gas residual en una chimenea o conducto. Este método es aplicable a corrientes de gas que fluyen en conductos, chimeneas y conductos de emisiones. No se puede utilizar cuando: (1) el flujo es ciclónico o giratorio; o (2) una chimenea es menor a 0,30 metros (12 pulgadas) o de diámetro 0,071 m² (113 pulgadas cuadradas) de área transversal. El procedimiento simplificado no puede ser usado cuando el sitio de medición está a menos de dos diámetros de la chimenea o conducto corriente abajo o menos de medio diámetro corriente arriba de una perturbación del flujo</p>
Método 2	<p>Determinación de la velocidad del gas de chimenea y velocidad de flujo (Tubo de Pitot tipo S) Este método Se aplica para determinar la velocidad promedio y la tasa de flujo volumétrico de un flujo de gas. No se puede utilizar para mediciones directas en corrientes de gas con flujo ciclónico o turbulento. Cuando las condiciones no son aceptables, se deben emplear procedimientos alternativos, sujetos a la aprobación de la autoridad respectivamente, para obtener determinaciones precisas de la tasa de flujo. Algunos ejemplos de estos procedimientos alternativos incluyen: (1) instalar alabes rectificadores, (2) calcular la tasa de flujo volumétrico total estequiométricamente, o (3) trasladarse a otro sitio de medición donde el flujo sea aceptable.</p>
Método 2A	<p>Medida directa del volumen del gas utilizando tuberías y pequeños conductos Este método es aplicable para determinar las tasas de flujo de gas en tuberías y conductos pequeños, ya sea en línea o en posiciones de escape, dentro del rango de temperatura de 0 a 50 °C (32 a 122 °F).</p>
Método 2B	<p>Determinación del flujo volumétrico de los gases de escape de los incineradores de vapor a gasolina Este método es aplicable para determinar la tasa de flujo volumétrico de escape en incineradores que procesan vapores de gasolina compuestos principalmente por alcanos, alquenos y/o hidrocarburos aromáticos (arenas). Se asume que la cantidad de combustible auxiliar es insignificante.</p>



Método 3 **Análisis gaseoso del dióxido de carbono, oxígeno, exceso de aire y peso molecular**

Este método es aplicable para determinar las concentraciones de CO₂ y O₂ y el peso molecular seco de una muestra de una corriente de gas de un proceso de combustión de combustibles fósiles u otros procesos. Otros métodos, así como modificaciones al procedimiento descrito en este método, también son aplicables para todas las determinaciones mencionadas. Ejemplos de métodos y modificaciones específicas incluyen: (1) un método de muestreo por extracción en múltiples puntos utilizando un analizador Orsat para analizar la muestra individual obtenida en cada punto; (2) un método para medir CO₂ u O₂ y usar cálculos estequiométricos para determinar el peso molecular seco; y (3) asignar un valor de 30,0 para el peso molecular seco, en lugar de mediciones reales, para procesos que queman gas natural, carbón o petróleo. Estos métodos y modificaciones pueden usarse, pero están sujetos a la aprobación de la autoridad respectivamente. El método también puede ser aplicable a otros procesos donde se haya determinado que compuestos distintos de CO₂, O₂, monóxido de carbono (CO) y nitrógeno (N₂) no están presentes en concentraciones suficientes para afectar los resultados

Método 3A **Determinación de la concentración de oxígeno y dióxido de carbono de emisiones procedentes de fuentes estacionarias (procedimientos del instrumental analizador)**

Es un procedimiento para medir oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂) en emisiones de fuentes estacionarias utilizando un analizador instrumental continuo. Incluye requisitos de aseguramiento y control de calidad para garantizar que, como evaluador, recopile datos de calidad conocida. Debe documentar su cumplimiento con estos requisitos específicos en cuanto a equipos, suministros, recolección y análisis de muestras, cálculos y análisis de datos. Este método no describe completamente todos los equipos, suministros y procedimientos de muestreo y análisis necesarios, pero hace referencia a otros métodos para algunos detalles. Por lo tanto, para obtener resultados confiables, también debe tener un conocimiento profundo de estos métodos adicionales que se encuentran en el apéndice A de esta parte: (a) Método 1: Trayectorias de muestreo y velocidad para fuentes estacionarias. (b) Método 3: Análisis de gas para la determinación del peso molecular. (c) Método 4: Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea. (d) Método 7E: Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno de fuentes estacionarias (procedimiento de analizador instrumental). El uso del Método 3A puede ser requerido por Normas de Desempeño para Nuevas Fuentes, reglas de Mercadeo del Aire Limpio, Planes de Implementación Estatales y permisos, donde se deben realizar mediciones de concentraciones de O₂ y CO₂ en emisiones de fuentes estacionarias, ya sea para determinar el cumplimiento de una norma de emisión aplicable o para realizar pruebas de rendimiento de un sistema de monitoreo continuo de emisiones (CEMS). Otras regulaciones también pueden requerir el uso de este método.



No. Método	Definición
Método 4	<p>Determinación del contenido de humedad en los gases de chimenea</p> <p>Este método se aplica para determinar el contenido de humedad en los gases de chimenea. El método de referencia se utiliza para determinaciones precisas del contenido de humedad (como las necesarias para calcular los datos de emisiones). El método de aproximación proporciona estimaciones del porcentaje de humedad para ayudar en la configuración de tasas de muestreo isocinético antes de una medición de emisiones de contaminantes. El método de aproximación descrito aquí es solo un enfoque sugerido; también se aceptan medios alternativos para estimar el contenido de humedad (por ejemplo, tubos de secado, técnicas de bulbo húmedo-bulbo seco, técnicas de condensación, cálculos estequiométricos, experiencia previa, etc.).</p>
Método 5	<p>Determinación de las emisiones de partículas en fuentes estacionarias</p> <p>Este método se aplica para determinar las emisiones de material particulado (PM) de fuentes estacionarias. El material particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recoge en un filtro de fibra de vidrio mantenido a una temperatura de 120 ± 14 °C (248 ± 25 °F) o cualquier otra temperatura especificada en una subparte aplicable de las normas o aprobada por la autoridad respectivamente para una aplicación particular. La masa de PM, que incluye cualquier material que se condensa a la temperatura de filtración o por encima de ella, se determina gravimétricamente después de la eliminación del agua no combinada.</p>
Método 5A	<p>Determinación de las emisiones de partículas en la industria del procesamiento de asfalto y cubiertas de asfalto</p> <p>Este método se aplica para determinar las emisiones de material particulado (PM) de saturadores de procesos en la industria del asfalto y techos, destiladores de soplado y otras fuentes especificadas en las regulaciones. El material particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recoge en un filtro de fibra de vidrio mantenido a una temperatura de 42 ± 10 °C (108 ± 18 °F). La masa de PM, que incluye cualquier material que se condensa a la temperatura de filtración o por encima de ella, se determina gravimétricamente después de la eliminación del agua no combinada..</p>
Método 5B	<p>Determinación de la emisión de partículas no sulfúricas procedentes de fuentes estacionarias</p> <p>Este método es aplicable para determinar material particulado no ácido sulfúrico de fuentes estacionarias, solo cuando lo especifique una subparte aplicable de las regulaciones o cuando lo apruebe el Administrador para una aplicación particular. El material particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recoge en un filtro de fibra de vidrio mantenido a una temperatura de 160 ± 14 °C (320 ± 25 °F). La muestra recolectada se calienta en un horno a 160 °C (320 °F) durante 6 horas para volatilizar cualquier ácido sulfúrico condensado que se haya recogido, y la masa de material particulado no ácido sulfúrico se determina gravimétricamente.</p>



No. Método	Definición
------------	------------

Método 5D **Determinación de las emisiones de partículas en filtros de tela de presión positiva**

Este método es aplicable para determinar las emisiones de material particulado (PM) de filtros de tela de presión positiva. Las emisiones se determinan en términos de concentración (mg/m^3 o gr/ft^3) y tasa de emisión (kg/hr o lb/hr). Las Disposiciones Generales del 40 CFR parte 60, §60.8(e), requieren que el propietario o el operador de una instalación afectada proporcionen instalaciones para pruebas de rendimiento. Dichas instalaciones incluyen puertos de muestreo, plataformas seguras de muestreo, acceso seguro a los sitios de muestreo y servicios públicos para pruebas. Se espera que las instalaciones afectadas también proporcionen ubicaciones de muestreo que cumplan con las especificaciones de longitud adecuada del conducto y mínimas perturbaciones de flujo, como se describe en el Método 1. Las disposiciones para las pruebas a menudo son factores pasados por alto en el diseño de filtros de tela o son extremadamente costosas. El propósito de este procedimiento es identificar ubicaciones y procedimientos alternativos adecuados para muestrear las emisiones de filtros de tela de presión positiva. Los requisitos de que el propietario u operador de la instalación afectada proporcione acceso adecuado a las instalaciones de prueba de rendimiento siguen vigentes.

Método 5E **Determinación de las emisiones de partículas procedentes de la industria de la fibra de vidrio y aislamiento**

Propósito y aplicabilidad: Este método es aplicable para determinar las emisiones de material particulado (PM) de fuentes de fabricación de aislamiento de fibra de vidrio de lana. El material particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recoge ya sea en un filtro de fibra de vidrio mantenido a una temperatura en el rango de 120 ± 14 °C (248 ± 25 °F) y en impingers en soluciones de hidróxido de sodio 0,1 N (NaOH). La masa de partículas filtradas, que incluye cualquier material que se condensa a la temperatura de filtración o por encima de ella, se determina gravimétricamente después de la eliminación del agua no combinada. El PM condensado recolectado en las soluciones del impinger se determina como carbono orgánico total (TOC) utilizando un analizador de tipo infrarrojo no dispersivo. La suma de la masa de PM filtrada y el PM condensado se informa como la masa total de PM.

Método 5F **Determinación de las emisiones de partículas no sulfatadas procedentes de fuentes estacionarias**

Este método es aplicable para determinar las emisiones de material particulado (PM) no sulfatado de fuentes estacionarias. El uso de este método debe ser especificado por una subparte aplicable de las normas o aprobado por el Administrador para una aplicación particular. El material particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recoge en un filtro mantenido a una temperatura en el rango de 160 ± 14 °C (320 ± 25 °F). La muestra recolectada se extrae con agua. Una parte del extracto se analiza para determinar el contenido de sulfato mediante cromatografía de iones. El resto se neutraliza con hidróxido de amonio (NH_4OH), se seca y se pesa. El peso del sulfato en la muestra se calcula como sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) y se resta del peso total de partículas; el resultado se informa como material particulado no sulfatado.



No. Método	Definición
------------	------------

Método 6	Determinación de las emisiones de dióxido de azufre procedentes de fuentes estacionario
----------	--

Este método se aplica a la medición de emisiones de dióxido de azufre (SO₂) de fuentes estacionarias. Se extrae una muestra de gas del punto de muestreo en la chimenea. Se separan el SO₂ y el trióxido de azufre, incluidas las fracciones presentes en cualquier neblina de ácido sulfúrico. La fracción de SO₂ se mide mediante el método de titulación de bario-torin.

Método 6A	Determinación de las emisiones de dióxido de azufre, humedad y dióxido de carbono procedentes de las fuentes de combustión de combustibles fósiles
-----------	---

Este método es aplicable para determinar las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) de fuentes de combustión de combustibles fósiles en términos de concentración (mg/dscm o lb/dscf) y en términos de tasa de emisión (ng/J o lb/106 Btu) y para la determinación de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en porcentaje. Si se desea, también se puede determinar el contenido de humedad (porcentaje) mediante este método. Se extrae una muestra de gas de un punto de muestreo en la chimenea. Se separan el SO₂ y el trióxido de azufre, incluidas las fracciones presentes en cualquier neblina de ácido sulfúrico. La fracción de SO₂ se mide mediante el método de titulación de bario-torin. Las fracciones de humedad y CO₂ se recogen en la misma cadena de muestreo y se determinan gravimétricamente.

Método 6B	Determinación de las emisiones diarias de dióxido de azufre y dióxido de carbono procedentes de las fuentes de combustión de combustibles fósiles
-----------	--

Este método es aplicable para determinar las emisiones de SO₂ de fuentes de combustión en términos de concentración (ng/dscm o lb/dscf) y tasa de emisión (ng/J o lb/106 Btu), y para la determinación de la concentración de CO₂ (porcentaje) en un periodo diario (24 horas). Se extrae una muestra de gas del punto de muestreo en la chimenea de forma intermitente durante un período de 24 horas u otro período de tiempo especificado. La fracción de SO₂ se mide mediante el método de titulación de bario-torin. Las fracciones de humedad y CO₂ se recogen en la misma cadena de muestreo y se determinan gravimétricamente.



No. Método	Definición
------------	------------

Método 6C **Determinación de las emisiones de dióxido de azufre procedentes de fuentes estacionarias (procedimientos del instrumental analizador)**

El Método 6C es un procedimiento para medir el dióxido de azufre (SO₂) en las emisiones de fuentes estacionarias utilizando un analizador instrumental continuo. Se incluyen requisitos de aseguramiento de la calidad y control de calidad para garantizar que usted, como evaluador, recoja datos de calidad conocida. Debe documentar su cumplimiento con estos requisitos específicos para equipos, suministros, recolección y análisis de muestras, cálculos y análisis de datos. Este método no describe completamente todos los equipos, suministros y procedimientos de muestreo y análisis que necesitará, pero hace referencia a otros métodos para algunos de los detalles. Por lo tanto, para obtener resultados confiables, también debe tener un conocimiento profundo de estos métodos adicionales que se encuentran en el apéndice A de esta parte: (a) Método 1: Muestreos de velocidad y trayectorias para fuentes estacionarias. (b) Método 4: Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea. (c) Método 6: Determinación de las emisiones de dióxido de azufre de fuentes estacionarias. (d) Método 7E: Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno de fuentes estacionarias (Procedimiento del analizador instrumental). El uso del Método 6C puede ser requerido por Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas específicas, reglas de Comercialización de Aire Limpio, Planes de Implementación Estatal y permisos donde las concentraciones de SO₂ en las emisiones de fuentes estacionarias deben medirse, ya sea para determinar el cumplimiento con una norma de emisión aplicable o para realizar pruebas de desempeño de un sistema de monitoreo continuo de emisiones (CEMS). Otras regulaciones también pueden requerir el uso del Método 6C.

Método 7 **Determinación de las emisiones del óxido de nitrógeno procedentes de fuentes estacionarias**

Este método es aplicable para la medición de óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos por fuentes estacionarias. Se recoge una muestra instantánea en un matraz evacuado que contiene una solución absorbente de ácido sulfúrico diluido y peróxido de hidrógeno, y los óxidos de nitrógeno, excepto el óxido nitroso, se miden colorimétricamente utilizando el procedimiento del ácido fenoldisulfónico (PDS).

Método 7A **Determinación de las emisiones del óxido de nitrógeno procedentes de fuentes estacionarias**

Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de NO_x de fuentes estacionarias. Se recoge una muestra instantánea en un matraz evacuado que contiene una solución absorbente de ácido sulfúrico diluido y peróxido de hidrógeno. Los óxidos de nitrógeno, excluyendo el óxido nitroso (N₂O), se oxidan a nitrato y se miden mediante cromatografía de iones.

Método 7B **Determinación de las emisiones del óxido de nitrógeno procedentes de fuentes estacionarias (espectrometría ultravioleta)**

Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de NO_x en plantas de ácido nítrico. Se recoge una muestra instantánea en un matraz que contiene una solución absorbente de ácido sulfúrico diluido y peróxido de hidrógeno; los NO_x, excluyendo el óxido nitroso (N₂O), se miden mediante espectrofotometría ultravioleta.



No. Método	Definición
Método 7C	<p>Determinación de las emisiones del óxido de nitrógeno procedentes de fuentes estacionarias</p> <p>Este método se aplica a la medición de las emisiones de NO_x en generadores de vapor alimentados con combustibles fósiles, plantas de servicios eléctricos, plantas de ácido nítrico u otras fuentes según lo especificado en las regulaciones. Se extrae una muestra de gas integrada del conducto y se pasa a través de impingers que contienen una solución de permanganato de potasio alcalino; las emisiones de NO_x (NO + NO₂) se oxidan a NO₂ y NO₃⁻. Luego, el NO₃⁻ se reduce a NO₂⁻ con cadmio, y el NO₂⁻ se analiza colorimétricamente.</p>
Método 7D	<p>Determinación de las emisiones del óxido de nitrógeno procedentes de fuentes estacionarias</p> <p>Este método se aplica a la medición de las emisiones de NO_x en generadores de vapor alimentados con combustibles fósiles, plantas de servicios eléctricos, plantas de ácido nítrico u otras fuentes según lo especificado en las regulaciones. Se extrae una muestra de gas integrada del conducto y se pasa a través de impingers que contienen una solución de permanganato de potasio alcalino; las emisiones de NO_x (NO + NO₂) se oxidan a NO₃⁻. Luego, el NO₃⁻ se analiza mediante cromatografía de iones.</p>
Método 7E	<p>Determinación de las emisiones de óxido de nitrógeno procedentes de fuentes estacionarias (procedimientos del instrumental analizador)</p> <p>El uso del Método 7E puede ser requerido por Normas de Rendimiento para Nuevas Fuentes Específicas, reglas de Clean Air Marketing, Planes de Implementación Estatales y permisos donde se requiere la medición de las concentraciones de NO_x en emisiones de fuentes estacionarias, ya sea para determinar el cumplimiento de una norma de emisiones aplicable o para realizar pruebas de rendimiento de un sistema de monitoreo continuo (CEMS). Otras regulaciones también pueden requerir el uso del Método 7E. En este método, una muestra del gas de efluente se muestrea continuamente y se transporta al analizador para medir la concentración de NO_x. Puede medir NO y NO₂ por separado o simultáneamente, pero, a los efectos de este método, NO_x es la suma de NO y NO₂. Debe cumplir con los requisitos de rendimiento de este método para validar sus datos.</p>
Método 8	<p>Determinación de las emisiones de niebla de ácido sulfúrico y dióxido de azufre procedente de fuentes estacionarias</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de emisiones de H₂SO₄ (incluyendo la neblina de H₂SO₄ y SO₃) y SO₂ gaseoso en fuentes estacionarias. Se extrae una muestra de gas isocinéticamente del conducto. El H₂SO₄ y el SO₂ se separan, y ambas fracciones se miden por separado utilizando el método de titulación de bario-torina.</p>
Método 9	<p>Determinación visual de la opacidad de las emisiones procedentes de fuentes estacionarias</p> <p>La opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias se determina visualmente por un observador calificado. Este método es aplicable para determinar la opacidad de las emisiones de fuentes estacionarias de acuerdo con §60.11(b) y para calificar a los observadores para determinar visualmente la opacidad de las emisiones.</p>



No. Método	Definición
Método 10	<p>Determinación de las emisiones de monóxido de carbono procedentes de fuentes estacionarias</p> <p>El Método 10 es un procedimiento para medir el monóxido de carbono (CO) en emisiones de fuentes estacionarias utilizando un analizador instrumental continuo. Se incluyen requisitos de control y garantía de calidad para asegurar que usted, como evaluador, recolecte datos de calidad conocida. Debe documentar su cumplimiento con estos requisitos específicos para equipos, suministros, recolección y análisis de muestras, cálculos y análisis de datos. Este método no describe completamente todos los equipos, suministros y procedimientos de muestreo y análisis que necesitará, sino que hace referencia a otros métodos para algunos detalles. Por lo tanto, para obtener resultados confiables, también debe tener un conocimiento profundo de estos métodos adicionales que se encuentran en el apéndice A de esta parte: (a) Método 1: Trayectorias de muestra y velocidad para fuentes estacionarias. (b) Método 4: Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea. (c) Método 7E: Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno de fuentes estacionarias (procedimiento de analizador instrumental). El uso del Método 10 puede ser requerido por Normas de Rendimiento para Fuentes Nuevas específicas, Planes de Implementación Estatales y permisos donde se deben medir las concentraciones de CO en emisiones de fuentes estacionarias, ya sea para determinar el cumplimiento de un estándar de emisión aplicable o para realizar pruebas de rendimiento de un sistema de monitoreo continuo de emisiones (CEMS). Otras regulaciones también pueden requerir el uso del Método 10.</p>
Método 10A	<p>Determinación de las emisiones de monóxidos de carbono para la certificación de los sistemas de medida en continuo de las emisiones en refinerías de petróleo</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de CO en refinerías de petróleo. Este método sirve como el método de referencia en la prueba de precisión relativa para sistemas de monitoreo continuo de emisiones de CO (CEMS) de infrarrojo no dispersivo (NDIR) que se requieren instalar en las refinerías de petróleo en regeneradores de catalizadores de unidades de craqueo catalítico fluido (§60.105(a)(2) de esta parte). Se extrae una muestra de gas integrada de la chimenea, se hace pasar a través de una solución de permanganato alcalino para eliminar óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno y se recoge en una bolsa de Tedlar o equivalente. (Verifique a través del fabricante que la alternativa de Tedlar sea adecuada para NO y ponga esta información verificada a disposición para su inspección). La concentración de CO en la muestra se mide espectrofotométricamente utilizando la reacción del CO con ácido p-sulfaminobenzoico.</p>
Método 11	<p>Determinación del contenido de sulfuro de hidrógeno en los gases de escape de refinerías de petróleo</p> <p>Este método es aplicable para la determinación del contenido de H₂S en corrientes de gas combustible en refinerías de petróleo. Se extrae una muestra de una fuente y se hace pasar a través de una serie de impingers en miniatura que contienen una solución de sulfato de cadmio (CdSO₄); el H₂S se absorbe, formando sulfuro de cadmio (CdS). Posteriormente, este compuesto se mide mediante un método yodométrico.</p>



No. Método	Definición
Método 12	<p>Determinación de las emisiones de plomo inorgánico procedentes de fuentes estacionarias</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de emisiones de plomo inorgánico provenientes de fuentes estacionarias, solo según lo especificado en una subparte aplicable de las regulaciones. Las emisiones de Pb particulado y gaseoso se extraen de manera isocinética de la fuente y se recolectan en un filtro y en ácido nítrico diluido. Las muestras recolectadas se digieren en una solución ácida y se analizan mediante espectrofotometría de absorción atómica utilizando una llama de aire/acetileno.</p>
Método 13A	<p>Determinación de las emisiones totales de fluoruro en fuentes estacionarias, método de la piscina SPADNS circonio</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de emisiones de fluoruro (F⁻) de fuentes según lo especificado en las regulaciones. No mide fluoro carbonos, como los Freones. El F⁻ gaseoso y particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recolecta en agua y en un filtro. Luego, se determina el F⁻ total mediante el método colorimétrico SPADNS Zirconium Lake.</p>
Método 13B	<p>Determinación de las emisiones totales de fluoruro en fuentes estacionarias, métodos del electrodo de ion específico</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de emisiones de fluoruro (F⁻) de fuentes según lo especificado en las regulaciones. No mide fluoro carbonos, como los Freones. El F⁻ gaseoso y particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recolecta en agua y en un filtro. Luego, se determina el F⁻ total mediante el método del electrodo de ion específico.</p>
Método 14	<p>Determinación de las emisiones de fluoruro procedentes de las plantas primarias de aluminio</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de emisiones de fluoruro de monitores de techo en grupos de sala de celdas de reducción primaria de aluminio. Las emisiones de fluoruro gaseoso y particulado de los monitores de techo se extraen a través de varias boquillas grandes hacia un colector de muestreo permanente. La muestra se transporta desde el colector de muestreo hasta el nivel del suelo a través de un conducto. El contenido de fluoruro en el gas del conducto se determina utilizando el Método 13A o el Método 13B. La velocidad del efluente y la tasa de flujo volumétrico se determinan utilizando anemómetros ubicados en el monitor de techo.</p>
Método 15	<p>Determinación de las emisiones de sulfuro de hidrógeno, sulfuro carbonilo y di sulfuro de carbono en fuentes estacionarias</p> <p>Este método se aplica a la determinación de emisiones de compuestos de azufre reducido de las unidades de control de gas de cola de plantas de recuperación de azufre, H₂S en gas combustible para dispositivos de combustión de gas combustible y donde se especifique en otras subpartes aplicables de las regulaciones. El método descrito a continuación utiliza el principio de separación por cromatografía de gases (GC) y detección fotométrica de llama (FPD). Dado que existen muchos sistemas o conjuntos de condiciones operativas que representan métodos utilizables para determinar las emisiones de azufre, todos los sistemas que emplean este principio, pero difieren solo en detalles de equipo y operación, pueden usarse como métodos alternativos, siempre que se cumplan los criterios de precisión de calibración y pérdida en la línea de muestra. Se extrae una muestra de gas de la fuente de emisión y se diluye con aire seco y limpio (si es necesario). Luego, se analiza una alícuota de la muestra diluida para determinar CS₂, COS y H₂S mediante GC/FPD.</p>



No. Método	Definición
Método 15A	<p>Determinación de las emisiones reducidas totales de azufre en plantas de recuperación de azufre en refinerías de petróleo</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de emisiones de compuestos de azufre reducido de plantas de recuperación de azufre donde las emisiones se encuentran en una atmósfera reductora, como en unidades Stretford. Se extrae una muestra de gas integrada del conducto de la chimenea y se añade aire de combustión al gas deficiente en oxígeno (O₂) a una tasa conocida. Los compuestos de azufre reducido (incluidos el disulfuro de carbono (CS₂), el sulfuro de carbonilo (COS) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S)) se oxidan térmicamente a dióxido de azufre (SO₂), que luego se recoge en peróxido de hidrógeno como ion sulfato y se analiza de acuerdo con el procedimiento de titulación de torio-bario del Método 6.</p>
Método 16	<p>Determinación semicontinua de las emisiones de azufre en fuentes estacionarias</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de compuestos de azufre reducido total (TRS) en hornos de recuperación, hornos de cal y tanques de disolución de fundente en fábricas de pasta de papel Kraft y dispositivos de combustión de gas combustible en refinerías de petróleo. Se extrae una muestra de gas de la fuente de emisión y se analiza una alícuota para determinar la presencia de sulfuro de hidrógeno (H₂S), metil mercaptano (MeSH), sulfuro de di metilo (DMS) y disulfuro de di metilo (DMDS) mediante GC/FPD. Estos cuatro compuestos se conocen colectivamente como TRS.</p>
Método 16A	<p>Determinación de las emisiones totales de azufre reducido en fuentes estacionarias (técnicamente incidente)</p> <p>Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de TRS en calderas de recuperación, hornos de cal y tanques de disolución de fundente en fábricas de pasta de papel Kraft, compuestos de azufre reducido (H₂S, sulfuro de carbonilo y disulfuro de carbono) en unidades de recuperación de azufre en instalaciones de procesamiento de gas natural en tierra y en otras fuentes cuando se especifique en una subparte aplicable de las regulaciones. El gas de combustión debe contener al menos un 1% de oxígeno para la oxidación completa de todos los TRS a SO₂. Se extrae una muestra de gas integrada del conducto. El SO₂ se elimina selectivamente de la muestra utilizando una solución tampón de citrato. Los compuestos TRS se oxidan térmicamente a SO₂, se recogen en peróxido de hidrógeno como sulfato y se analizan mediante el procedimiento de titulación de bario-torina del Método 6.</p>
Método 16B	<p>Determinación de las emisiones totales de azufre reducido en fuentes estacionarias</p> <p>Este método es aplicable para determinar las emisiones de TRS en calderas de recuperación, hornos de cal y tanques de disolución de fundente en fábricas de pasta de papel kraft, y en otras fuentes cuando se especifique en una subparte aplicable de las regulaciones. El gas de combustión debe contener al menos un 1% de oxígeno para la oxidación completa de todos los TRS a SO₂. Se extrae una muestra de gas del conducto. El SO₂ se elimina selectivamente de la muestra utilizando una solución tampón de citrato. Los compuestos TRS se oxidan térmicamente a SO₂ y se analizan como SO₂ mediante cromatografía de gases (GC) utilizando detección fotométrica de llama (FPD).</p>



Método 17 **Determinación de las emisiones de partículas en fuentes estacionarias (método de la filtración dentro de la chimenea)**

Este método es aplicable para determinar las emisiones de material particulado (PM), donde se sabe que las concentraciones de PM son independientes de la temperatura en el rango normal de temperaturas características de las emisiones de una categoría de fuente específica. Está destinado a utilizarse solo cuando lo especifique una subparte aplicable de las normas, y solo dentro de los límites de temperatura aplicables (si se especifican) o cuando el Administrador lo apruebe. Este método no es aplicable a chimeneas que contienen gotas líquidas o están saturadas con vapor de agua. Además, este método no debe utilizarse tal como está escrito si el área de la proyección de la sección transversal del ensamblaje de la extensión de la sonda y el soporte del filtro cubre más del 5% del área de la sección transversal de la chimenea. El material particulado se extrae de manera isocinética de la fuente y se recoge en un filtro de fibra de vidrio mantenido a la temperatura de la chimenea. La masa de PM se determina gravimétricamente después de eliminar el agua no combinada.

Método 18 **Medida de las emisiones de compuestos orgánicos mediante cromatografía de gases**

Este método está diseñado para medir compuestos orgánicos gaseosos emitidos por una fuente industrial. Aunque está diseñado para fuentes a nivel de ppm, algunos detectores son capaces de detectar compuestos a niveles ambientales, por ejemplo, ECD, ELCD y detectores de ionización de helio. Otros tipos de detectores están evolucionando, por lo que la sensibilidad y aplicabilidad podrían estar en el rango de ppb en solo unos años. Este método no determinará compuestos que (1) sean poliméricos (de alto peso molecular), (2) puedan polimerizar antes del análisis o (3) tengan presiones de vapor muy bajas en las condiciones de la chimenea o instrumento. Los principales componentes orgánicos de una mezcla gaseosa se separan mediante cromatografía de gases (GC) y se cuantifican individualmente mediante ionización de llama, fotoionización, captura de electrones u otros principios de detección adecuados. Los tiempos de retención de cada componente separado se comparan con los de compuestos conocidos en condiciones idénticas. Por lo tanto, el analista confirma previamente la identidad y las concentraciones aproximadas de los componentes de emisión orgánica. Con esta información, el analista prepara o compra mezclas estándar disponibles comercialmente para calibrar la GC en condiciones idénticas a las de las muestras. El analista también determina la necesidad de dilución de la muestra para evitar la saturación del detector, la filtración del flujo de gas para eliminar las partículas y la prevención de la condensación de humedad.



No. Método	Definición
------------	------------

Método 19 Determinación de la eficacia de eliminación de dióxido de azufre y ratios de emisión de partículas, dióxido de azufre y óxido de nitrógeno

Cuando lo especifique una subparte aplicable de las regulaciones, este método es aplicable para la determinación de (a) tasas de emisión de PM, SO₂ y NO_x; (b) eficiencias de eliminación de azufre en el pretratamiento de combustibles y dispositivos de control de SO₂; y (c) reducción general del potencial de emisiones de SO₂. Tasas de emisión: Se utilizan las concentraciones de oxígeno (O₂) o dióxido de carbono (CO₂) y factores F adecuados (relaciones de volúmenes de gas de combustión a aportes de calor) para calcular las tasas de emisión de contaminantes. Eficiencia en la reducción de azufre y eficiencia en la eliminación de SO₂: Se calcula una eficiencia general de reducción de emisiones de SO₂ a partir de la eficiencia de los sistemas de pretratamiento de combustible, cuando corresponda, y la eficiencia de los dispositivos de control. La eficiencia en la eliminación de azufre de un sistema de pretratamiento de combustible se determina mediante el muestreo y análisis del azufre y contenido calórico del combustible antes y después del sistema de pretratamiento. La eficiencia en la eliminación de SO₂ de un dispositivo de control se determina midiendo las tasas de SO₂ antes y después del dispositivo de control. Las tasas de entrada a los sistemas de control de SO₂ (o, cuando no se utilizan sistemas de control de SO₂, las tasas de emisión de SO₂ a la atmósfera) se determinan mediante el muestreo y análisis de combustible.

Método 20 Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y oxígeno en turbinas estacionarias de gas

El uso del Método 20 puede ser requerido por Normas de Rendimiento para Fuentes Nuevas específicas, Planes Estatales de Implementación y permisos donde se requiera medir las concentraciones de SO₂, NO_x, CO₂ y/o O₂ en emisiones de turbinas de gas estacionarias. Otras regulaciones también pueden requerir su uso.

Método 21 Determinación de las fugas de compuestos orgánicos volátiles

Este método es aplicable para la determinación de fugas de compuestos orgánicos volátiles (VOC) en equipos de proceso. Estas fuentes incluyen, pero no se limitan a, válvulas, bridas y otras conexiones, bombas y compresores, dispositivos de alivio de presión, drenajes de proceso, válvulas de extremo abierto, ventilaciones de desgasificación de sistemas de sellado de bombas y compresores, ventilaciones de recipientes acumuladores, sellos de agitador y sellos de puertas de acceso. Se utiliza un instrumento portátil para detectar fugas de VOC en fuentes individuales. El tipo de detector del instrumento no está especificado, pero debe cumplir con las especificaciones y criterios de rendimiento contenidos en la Sección 6.0. Se especifica una concentración de definición de fuga basada en un compuesto de referencia en cada regulación aplicable. Este método está destinado a localizar y clasificar fugas solamente, y no debe utilizarse como medida directa de la tasa de emisión de masa de fuentes individuales.

Método 22 **Determinación visual de las emisiones difusas de fuentes materiales y emisiones de humo procedente de llamas**

Este método se utiliza para determinar las emisiones fugitivas producidas durante la manipulación, el procesamiento y la transferencia de materiales o las emisiones de humo de quemadores que se utilizan para la combustión de materiales de proceso de desecho. Las emisiones visibles son determinadas visualmente por un observador sin la ayuda de instrumentos. El método determina el tiempo en que las emisiones visibles ocurren durante el período de observación (es decir, el tiempo de emisión acumulado). Este método no requiere la determinación de la opacidad de las emisiones. Aunque no se requiere la certificación del observador según los procedimientos del Método 9, es necesario que el observador tenga conocimientos sobre los procedimientos generales para determinar la presencia de emisiones visibles. El observador debe estar capacitado y ser conocedor de los efectos del contraste de fondo, la iluminación ambiental, la posición del observador en relación con la iluminación, el viento y la presencia de agua no combinada (vapor de agua condensante) en la visibilidad de las emisiones.

Método 24 **Determinación del contenido de materia volátil, contenido de agua, densidad volátil, contenido de agua, densidad, sólidos volumétricos, sólidos pesados durante el recubrimiento de superficies**

Este método es aplicable para la determinación del contenido de materia volátil, contenido de agua, densidad, sólidos volumétricos y sólidos en peso de pintura, barniz, laca u otros recubrimientos de superficie relacionados. Este método se utiliza para la determinación del contenido de materia volátil, contenido de agua, densidad, sólidos volumétricos y sólidos en peso de pintura, barniz, laca u otros recubrimientos de superficie relacionados.

Método 24A **Determinación del contenido de materia volátil y densidad en las tintas de imprenta y pinturas relacionadas**

El propósito de este método es determinar el contenido de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y la densidad de tintas de rotograbado publicitario a base de disolventes y recubrimientos relacionados. El método implica la medición de la fracción de peso de VOC y la densidad de la tinta o recubrimiento y la densidad del disolvente en la tinta o recubrimiento. La fracción de peso de VOC se determina midiendo la pérdida de peso de una cantidad de muestra conocida que ha sido calentada durante un tiempo y temperatura especificados. La densidad tanto de la tinta o recubrimiento como del disolvente se mide mediante un procedimiento estándar y, a partir de esta información, se calcula la fracción de volumen de VOC. Este método es aplicable en la industria de impresión y revestimientos para cumplir con las regulaciones de emisiones de VOC.



Método 25 Determinación de las emisiones gaseosas orgánicas no metánicas como contenido de carbono

El propósito de este método es determinar el contenido de compuestos orgánicos volátiles (VOC) en emisiones de fuentes estacionarias, medidos como gaseosos orgánicos no metano totales (TGNMO) y reportados como carbono. Este método no es aplicable para la determinación de materia particulada orgánica. El método implica la extracción de una muestra de emisión de la fuente, su análisis independiente en un condensador y un tanque de muestra y la combinación de los resultados. El contenido orgánico se mide oxidando los TGNMO a dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), que se miden por un detector de ionización de llama (FID) para eliminar la respuesta variable del FID asociada con diferentes tipos de orgánicos. Este método es aplicable en la medición de emisiones de VOC de fuentes estacionarias y requiere el uso de equipo especializado. Otros métodos de prueba también pueden ser aplicables según la composición molecular de los orgánicos en la corriente de efluentes.

Método 25A Determinación de la concentración total de gases orgánicos usando el analizador de ionización de llama

El propósito de este método es determinar la concentración total de compuestos orgánicos gaseosos en vapores que consisten principalmente en alcanos, alquenos y/o aromáticos (hidrocarburos aromáticos). La concentración se expresa en términos de propano (u otro gas de calibración orgánico apropiado) o en términos de carbono. Este método es aplicable en la medición de la concentración de compuestos orgánicos en gases emitidos por fuentes estacionarias y móviles, como la industria química, petroquímica, refinerías, y en la evaluación de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales. El método implica la extracción de una muestra de aire, su preconcentración mediante adsorción en un tubo de carbón activado y su posterior análisis mediante cromatografía de gases. Este método es sensible y selectivo para la detección de una amplia variedad de compuestos orgánicos, lo que lo hace útil en la evaluación de la exposición ocupacional y ambiental a compuestos orgánicos.

Método 25B Determinación de la concentración total de gases orgánicos usando un analizador no-dispersivo infrarrojo

El propósito de este método es determinar la concentración total de compuestos orgánicos gaseosos en vapores que consisten principalmente en alcanos. Otros materiales orgánicos pueden medirse utilizando el procedimiento general de este método, el gas de calibración apropiado y un analizador ajustado a la banda de absorción correspondiente. Este método es aplicable para medir la concentración de compuestos orgánicos en emisiones de fuentes estacionarias y móviles, como la industria química, petroquímica y de refinación, y para evaluar la calidad del aire en zonas urbanas e industriales. El método implica la extracción de una muestra de gas de la fuente a través de una línea de muestra calentada y un filtro de fibra de vidrio hacia un analizador de infrarrojo no dispersivo (NDIR). Los resultados se informan como equivalentes de concentración de volumen del gas de calibración o como equivalentes de carbono. Este método es rápido, sensible y selectivo para la detección de alcanos y se utiliza comúnmente en la evaluación de la exposición ocupacional y ambiental a compuestos orgánicos.



No. Método	Definición
Método 27	<p>Determinación de la tensión del vapor de gasolina de un depósito de suministro usando el análisis presión-vacío</p> <p>Este método es aplicable para determinar la estanqueidad al vapor del equipo de recolección de entrega de gasolina. La presión y el vacío se aplican alternativamente a los compartimentos de un tanque de entrega de gasolina, y el cambio en la presión o el vacío se registra después de un período de tiempo especificado. Entendiéndose como estanqueidad a la propiedad que se caracteriza por la capacidad de evitar que penetren elementos externos al interior de una pieza, circuito o habitáculo, ya sean fluidos, partículas o aire</p>

Nota. Adaptado de Code of Federal Regulations, 2022

3.7. Muestreo isocinético de emisiones atmosféricas

El muestreo isocinético de emisiones atmosféricas se lleva a cabo mediante el equipo denominado "tren isocinético". Este equipo ejecuta varios de los métodos de referencia aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US. EPA. En su versión estándar, el tren isocinético se compone de una consola del muestreador, que incluye un transductor de presión diferencial (o manómetros de doble columna), válvulas de control de flujo de muestra con medidor de flujo de orificio, medidor de gas seco y controles eléctricos. La consola del muestreador de fuentes es el puesto de control del operador, desde donde se supervisa la velocidad y las temperaturas del gas en el lugar de muestreo y se controla la velocidad de muestreo y las temperaturas del sistema. Dentro de la consola se encuentran los subsistemas eléctricos, de termopar y de vacío.

Se incluye una bomba externa de paletas rotativas (o bomba interna de diafragma), que incluye mangueras con accesorios de conexión rápida y lubricador. La unidad de bomba externa proporciona el vacío necesario para extraer la muestra de la chimenea. El tipo más común de conjunto de bomba se conecta a la consola del muestreador de origen a través de un receptáculo eléctrico y dos (2) extensiones de manguera de 1,524 m (5 pies) con conexiones rápidas de 9,525 mm (3/8 in) (configuradas con un conector macho en el lado de la presión y un conector hembra en el lado de la aspiración).



Se incluye un conjunto de sonda que consta de una funda de sonda de acero inoxidable, un revestimiento de sonda, un calentador de tubo, un tubo de Pitot tipo S termopares de chimenea y calentador, y una línea Orsat. Además, se incluye un estuche modular para muestras que incluye un horno para el conjunto de filtros, un estuche para cristalería del impulsor y conexiones eléctricas. Por último, se tiene un cable umbilical que incluye líneas eléctricas y neumáticas para conectar la caja de muestras modular a la consola del medidor de muestreo de la fuente.

Antes de realizar el muestreo isocinético, es necesario definir los parámetros de la prueba respondiendo a las siguientes preguntas: ¿cuál es el propósito de la prueba? ¿quién utilizará los datos obtenidos? ¿qué chimeneas o puntos de emisión se están evaluando? ¿qué datos del proceso se recogen y se correlacionan con los resultados de la prueba? ¿dónde se encuentran los puertos de muestreo y qué tipo de acceso hay disponible? ¿cuándo se ha programado la prueba y cuáles son los plazos de notificación? ¿cuál es el método o procedimiento específico para seguir? ¿cuántas ejecuciones de prueba o condiciones de proceso se evaluarán?

La preparación del lugar para que el equipo de muestreo pueda colocarse correctamente suele ser la parte más difícil del proceso de muestreo. Cuando los puertos de muestreo no cuentan con una plataforma o pasarela, es necesario montar un andamio para llegar al lugar de muestreo. En muchos casos, los operarios deben usar su ingenio para llevar el equipo de muestreo hasta el lugar de muestreo.

Al seleccionar el lugar de los puertos de muestreo, se debe tomar en cuenta que la distancia desde la sonda hasta el fondo de la caja de muestras es de unos 33 cm. Esto significa que, al atravesar la chimenea, el equipo de muestreo necesita 33 cm de espacio libre por debajo del nivel del puerto para evitar chocar con las barandillas u otras estructuras.



Para calcular el espacio libre necesario a lo largo del plano del puerto de muestreo, se debe comenzar con la longitud efectiva de la sonda (que es el diámetro de la chimenea más la longitud de la boquilla del puerto) y a la cual se debe sumar al menos 91 cm para acomodar la longitud de la caja de la muestra (horno de filtro, caja de impingers, y abrazadera de la sonda).

Se debe llevar a cabo una prueba de flujo de gas mediante el uso de una sonda direccional y manómetros diferenciales. Se recomienda seguir las instrucciones del fabricante al preparar la sonda y los manómetros y utilizar tubos capilares o tanques de compensación para estabilizar la presión. También se sugiere realizar una verificación de fugas antes de la prueba, aunque no es obligatorio.

Para comprobar las fugas, se aplica presión o succión a la abertura de impacto hasta que se registra una lectura de al menos 3 pulgadas de H₂O en el manómetro diferencial y luego se tapa la abertura de impacto. Si el sistema no tiene fugas, la presión debería mantenerse constante durante al menos 15 segundos. Es importante tener en cuenta que los manómetros deben estar nivelados y a cero y verificar estos valores periódicamente durante la prueba.

La sonda se coloca en los lugares apropiados de la corriente de gas y se gira hasta que el manómetro del ángulo de guiñada muestra una lectura cero. Las lecturas del manómetro para el ángulo de cabeceo se registran y se determina el ángulo de cabeceo utilizando una curva de calibración. Este proceso se repite en cada punto transversal. Antes de realizar las mediciones en cada punto transversal, se deben limpiar las líneas de presión y las aberturas de impacto. Si el sistema no cumple con los criterios de sin fugas, se debe reparar el equipo y volver a realizar las mediciones del ángulo de flujo.

Antes de intentar calcular los parámetros necesarios para el muestreo isocinético, como el tamaño de la boquilla de la sonda, la relación $\Delta H/\Delta p$ (factor K),



el volumen de la muestra de gas, etc., primero se deben determinar varios valores preliminares, como la cabeza de presión de la velocidad media de los gases de la chimenea (Δp_{avg}), la que se determina antes de la ejecución de la muestra (lo mejor), o una prueba anterior (a menudo errónea). La presión del gas de chimenea (P_s), la que se determina antes de la ejecución de la muestra (lo mejor), o una prueba anterior (error muy pequeño) (Apex Instrument, 2022).

La presión del contador de gas seco (P_m), que es igual a la presión barométrica. La fracción de humedad del gas de chimenea (B_{ws}), que se determina antes de la ejecución de la muestra (lo mejor), o una prueba anterior (a menudo errónea). La temperatura promedio del gas de la chimenea (T_s), determinada antes de la ejecución de la muestra (lo mejor), o mediante una prueba anterior (a menudo errónea) (Apex Instrument, 2022).

La masa molar del gas de chimenea (M_d), que se determina antes de la ejecución de la muestra (mejor), o una prueba anterior (error muy pequeño). El factor de calibración del medidor de orificios ($\Delta H@$), determinado previamente en el laboratorio (Apex Instrument, 2022).

A continuación, se describen brevemente los métodos de referencia (Método del 1 al 5) que sirven de base para el resto de métodos con ciertas modificaciones, como la adición de aditamentos u otros equipos, así como la utilización de otro tipo de sustancias que sirven para producir reacciones selectivas de los contaminantes de interés.

3.7.1. Método 1. Selección de puntos de muestreo

Este método presenta la metodología para definir los puntos de muestreo, para lo cual utiliza el criterio de dividir una succión del ducto de la chimenea en áreas iguales. Las distancias se miden en diámetros de la chimenea. Para definir estos



puntos de muestreo, primero se debe determinar la posición del orificio de toma de muestra respecto de la salida a la atmósfera de los gases y el flujo bajo hasta la primera turbulencia, siendo esta última una de las restricciones, derivaciones, llamas, ventiladores, etc.

Este método no debe ser utilizado en ductos de chimenea menores a 0,3 m o 0,071 m² de área. Idealmente, la ubicación del orificio de muestreo en la chimenea deberá estar a 2 diámetros desde la salida de las emisiones a la atmósfera, desde el orificio que toma muestras, y a 8 diámetros de la última perturbación. Esta disposición del orificio de muestreo es para realizar la recolección de la muestra en la zona que se encuentre en régimen laminar. En el caso de no poder cumplir esta condición por cuestiones de diseño y rendimiento de la fuente, el mínimo necesario para la ubicación del punto de muestreo corresponde a 2 diámetros y ½ diámetro, respectivamente (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

La determinación del número de puntos de muestreo está en función de la necesidad de muestreo, ya sea para determinar el material particulado o solo la velocidad de las emisiones.

En caso de que la necesidad sea la determinación del material particulado y se cumpla con el criterio de ubicación del punto de muestreo que es de 8 diámetros y 2 diámetros, entonces si el diámetro del ducto de la chimenea es mayor a 0,61 m será de 12 puntos de muestreo. Si el diámetro del ducto de la chimenea se encuentra entre 0,3 y 0,61 m será de 8 puntos de muestreo. Si el diámetro del ducto de la chimenea se encuentra entre 0,3 y 0,61 m y es rectangular será de 9 puntos de muestreo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



Los cálculos y tablas utilizados para el cálculo de los puntos de monitoreo el lector puede revisar la referencia bibliográfica de esta obra, donde se expone el link referente al Método 1 — Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources.

En caso de tener ductos pequeños de chimeneas, se utiliza el Método 1A del U.S.EPA, que establece que, en ductos menores a 0,30 m de diámetro o 0,071 m² de área, la perturbación que provoca el equipo con el que se realizan las mediciones de velocidad es tan grande que se deben ubicar dos orificios: uno para la medición de la velocidad y el segundo para la muestra del material particulado. En este método, se establecen iguales condiciones que en el método 1 para la cantidad y ubicación de puntos de muestreo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En caso de que el lector tenga la necesidad de profundizar en el Método 1 A - Method 1A—Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources With Small Stacks or Ducts, puede revisar las referencias bibliográficas de esta obra, donde se exponen los links directos al método de interés y se puede descargar en formato digital.

La ubicación de los puntos de muestreo debe tomar en consideración la estratificación que pueden experimentar las partículas de las emisiones gaseosas dentro de la chimenea por su diseño.

3.7.1.1. Determinación de los puntos transversales de muestreo para chimeneas circulares

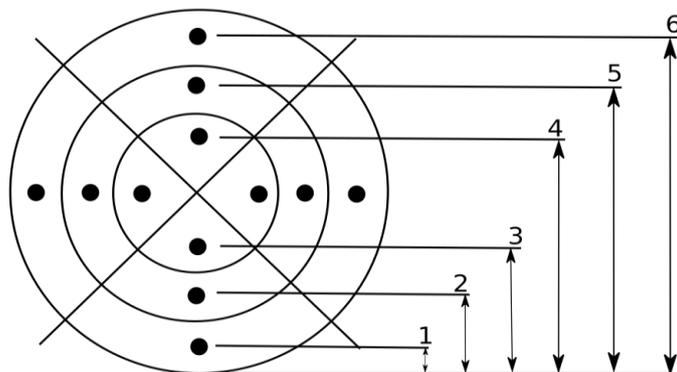
Una vez determinado el número de puntos transversales, se debe calcular la ubicación de cada punto transversal. El método para localizar los puntos transversales para chimeneas circulares es el siguiente:



- 1) Se debe dividir el número de puntos transversales por cuatro (4). El número resultante le dará el número de círculos concéntricos de igual área que debe utilizar en su matriz de puntos de muestreo.
- 2) Posteriormente se divide los círculos dos veces, cortándolos en cuartos, como se presenta en la Figura 6.
- 3) Se coloca los puntos de muestra en el centroide (centro de masa) de cada área igual, como se presenta en la Figura 3-1.

Figura 3-1

Puntos transversales situados en los centroides para la chimenea circular.



Nota. Adaptado de Apex Instrument, (2022)

3.7.1.2. Ubicación y marcado de puntos transversales en chimeneas circulares

La localización de cada punto transversal a través del diámetro de una chimenea circular y marcado del punto correspondiente en el conjunto de la sonda o el tubo pitot, debe ser realizada siguiendo el procedimiento que a continuación se detalla:

- 1) En primer lugar, se debe multiplicar el diámetro de la chimenea por el porcentaje tomado de la columna correspondiente de la Tabla 3-5.



Tabla 3-5*Ubicación de los puntos transversales en chimeneas circulares*

Número de punto transversal en un diámetro	Número de puntos transversales en un diámetro				
	4	6	8	10	12
4	93,3	70,4	32,3	22,6	17,7
5		85,4	67,7	34,2	25,0
6		95,6	80,6	65,8	35,6
7			89,5	77,4	64,4
8			96,8	85,4	75,0
9				91,8	82,3
10				97,4	88,2
11					93,3
12					97,9

Nota. Adaptado de Method 1 - U.S. Environmental Protection Agency (2022)

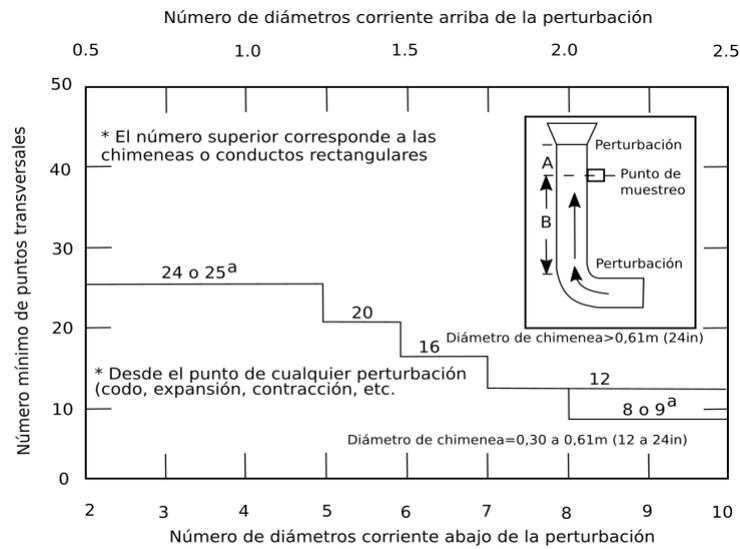
- 2) Se debe adicionar la longitud de la boquilla del puerto al valor calculado en el paso 1 para cada punto transversal.
- 3) Redondee cada valor al 1/8 (0,125) de pulgada más cercano para cada punto (sólo unidades inglesas).
- 4) Para chimeneas de más de 60 cm (24 in) de diámetro, se debe reubicar los puntos transversales más cercanos a 2,5 cm (1,00 in) a la pared de la chimenea a 2,5 cm y es recomendable etiquetarlos como puntos "ajustados".
- 5) Para chimeneas de menos de 60 cm de diámetro, utilice una distancia ajustada de 1,3 cm para reubicar cualquier punto lejos de la pared de la chimenea.
- 6) Mida la ubicación de cada punto transversal desde la punta del tubo pitot y marque la distancia con cinta de fibra resistente al calor o con líquido corrector.

Utilizando la (para material particulado) o Figura 3-2 (para la velocidad del gas), se determina dónde interseca la distancia A (arriba) con la línea de puntos transversales que atraviesa el centro del gráfico (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



Figura 3-2

Número mínimo de puntos transversales de muestreo para la velocidad transversal (particulada)

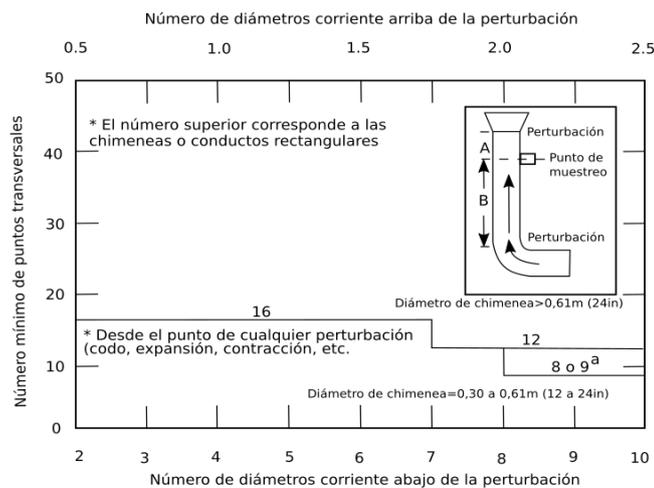


Nota. Adaptado de (U.S. Environmental Protection Agency, 2022)

Luego, se debe determinar dónde la distancia B se encuentra con la línea de puntos transversales y se selecciona el mayor de los dos números como el número mínimo de puntos transversales necesarios para el muestreo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Figura 3-3

Número mínimo de puntos transversales de muestreo para la velocidad transversal (no particulada)



Nota. Adaptado de (U.S. Environmental Protection Agency, 2022)

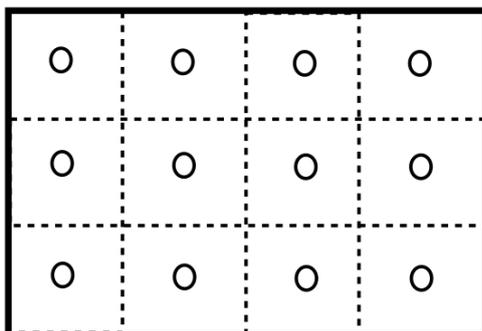


3.7.1.3. Determinación, ubicación y marcado de los puntos transversales de muestreo para chimeneas rectangulares

En el caso de chimeneas rectangulares, los centroides para colocar los puntos transversales son mucho más fáciles de determinar, como se presenta en la Figura 3-4

Figura 3-4

Puntos transversales situados en los centroides para la chimenea rectangular. Adaptado de Method 1



Nota. Adaptado de U.S. Environmental Protection Agency (2022)

La ubicación y marcado de los puntos transversales de muestreo, toma en consideración los datos correspondientes a la disposición de la sección transversal de las pilas rectangulares, presentados en la Tabla 3-6

Tabla 3-6

Disposición de la sección transversal de las chimeneas rectangulares

Número de puntos transversales	Diseño de la matriz
9	3x3
12	4x3
16	4x4
20	5x4
25	5x5
30	6x5
36	6x6
42	7x6
49	7x7

Nota. Adaptado de Method 1 - U.S. Environmental Protection Agency (2022)



Se debe considerar que, el número mínimo de puntos transversales requeridos para chimeneas rectangulares corresponde a 3x3.

Para una sección transversal rectangular, la determinación de las distancias desde el puerto de muestreo corriente arriba y corriente abajo será calculado un diámetro equivalente (D_e) utilizando la ecuación (3-1) (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$D_e = \frac{2LW}{L + W} \quad (3-1)$$

Donde:

L = Longitud.

W = Ancho.

3.7.1.4. Determinación de puntos transversales en chimeneas pequeñas

El Método 1A se utiliza para determinar los puntos transversales en chimeneas pequeñas y es similar en aplicabilidad y principio al Método 1, pero se limita a chimeneas y conductos. Este método es apropiado para flujos de gas en conductos, chimeneas y conductos de humos con diámetros menores a 30 cm o áreas de sección transversal menores a 710 cm², pero mayores o iguales a 10 cm de diámetro o áreas de sección transversal mayores o iguales a 81 cm². No se puede utilizar este método cuando el flujo es ciclónico o en remolino (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En chimeneas o conductos pequeños, el equipo de muestreo tradicional del Método 5 (que consiste en un tubo de Pitot del tipo S conectado a una sonda de muestreo con una boquilla y un termopar) obstruye una parte significativa de la sección transversal del conducto y produce mediciones inexactas. Por lo tanto, para



muestrear partículas (PM) en chimeneas o conductos pequeños, se mide la velocidad del gas utilizando un tubo de Pitot estándar aguas abajo del lugar de muestreo real de las emisiones. El trayecto recto del conducto entre los lugares de muestreo de PM y medición de la velocidad permite que el perfil de flujo, temporalmente perturbado por la presencia de la sonda de muestreo, se estabilice de nuevo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

3.7.1.5. Verificación de la ausencia de flujo ciclónico

Es habitual que el gas que sale por la chimenea fluya en dirección paralela a las paredes de esta en la mayoría de las fuentes estacionarias. No obstante, en algunos casos puede presentarse un flujo ciclónico. Esto puede ocurrir tras utilizar dispositivos como ciclones o eliminadores de inercia que siguen a depuradores Venturi, o en chimeneas con entradas tangenciales o ciertas configuraciones de conductos que tienden a provocar remolinos. Por ello, es necesario determinar si existe flujo ciclónico en el lugar de muestreo en estas circunstancias especiales.

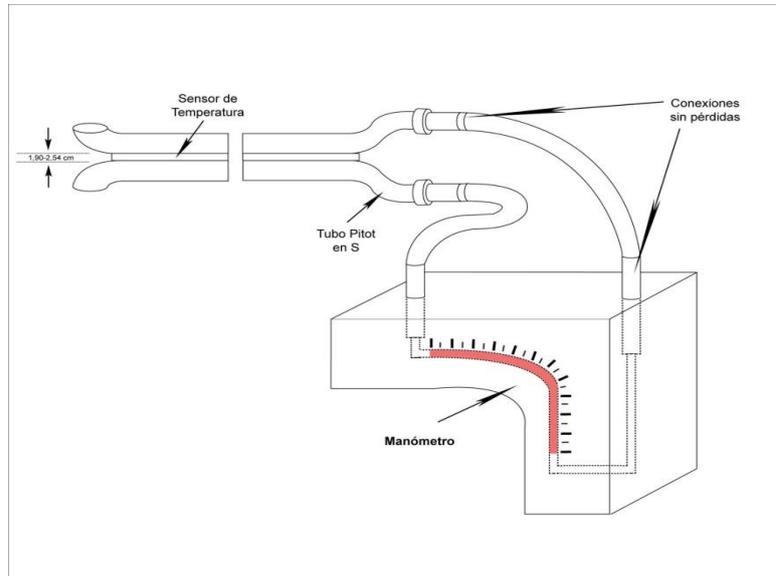
3.7.2. Método 2. Determinación de la velocidad y caudal con Pitot Tipo “S”

La velocidad de un fluido puede ser medida por varios métodos, uno de los más utilizados, especialmente en lo referente a las mediciones de emisiones gaseosas, es la medición mediante un dispositivo llamado Tubo Pitot que mide las diferencias de presión dentro del conducto que transporta el fluido, diferencia que se da entre el orificio que está frente al flujo del fluido de la velocidad y la presión que recibe el orificio práctico en la pared del conducto. (Ver Figura 3-5).



Figura 3-5

Esquema del equipo medidor de la velocidad. Adaptado de Method 4



Nota. Adaptado de U.S. Environmental Protection Agency (2022)

Existen diversos tipos de dispositivos, siendo el Tubo Pitot tipo "S", el mencionado en estos métodos, un dispositivo que consta de dos ramas de sección circular que tienen una terminación oval. Las ramas miden la presión estática y la presión de choque de forma independiente una de la otra. Al otro extremo de cada rama se conecta un manómetro para realizar la medida mediante la diferencia de altura. Además, al mismo tiempo se determina la temperatura a través de una termocupla (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

El tubo de Pitot debe ser calibrado previamente para obtener su coeficiente característico, realizando esta calibración mediante la utilización de un dispositivo llamado Pitot Standard, cuyo coeficiente es muy cercano a uno (1). La determinación de la constante del tubo de Pitot Standard se obtiene mediante la medición de ciertas dimensiones y el radio de curvatura. La calibración se realiza en un túnel de viento de dimensiones definidas, así como para los ventiladores.



La medición de la velocidad se realiza mediante la medición del diámetro del conducto, la medición de las distancias desde el orificio de toma de muestras hasta la salida y desde la última perturbación, el cálculo de la cantidad de puntos para medir la velocidad dentro de la sección del ducto y el cálculo de las distancias desde la pared interna de la chimenea para cada punto en los dos diámetros. Además, se necesita conocer la masa molar del gas en base húmeda, para lo cual se puede utilizar el Método 3 de la U.S. EPA. Con estos datos se requiere el coeficiente del tubo de Pitot, para su cálculo es necesario determinar la humedad del gas, así como la presión barométrica, y se puede utilizar el Método 4 de la U.S. EPA. Una vez se hayan seguido estos pasos, se procede a ensamblar el Tubo Pitot Tipo "S".

La medición se realiza siguiendo los siguientes pasos: se identifican las fugas en las líneas de presión, se calibra el manómetro a cero, se toman las medidas de diferencia de presión para cada punto de monitoreo calculado iniciando desde el primero, se realizan los chequeos necesarios para la detección de fugas, se realiza la medición de la presión estática en la chimenea y se realizan los cálculos para obtener la velocidad promedio.

La determinación de la masa molar en base húmeda se lleva a cabo de dos formas diferentes: tomando como masa molar en base seca 29 g/g-mol (esto está permitido en las dos normas en los casos de bajas emisiones) y midiendo la masa molar en base seca mediante el método 3 de la U.S. EPA. Si el lector desea profundizar en este método, puede consultar el enlace de descarga de la norma técnica en formato digital en la referencia bibliográfica como Método 2 — Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube).



3.7.2.1. Cálculo de la velocidad y caudal con Pitot Tipo “S”

a) Velocidad promedio del gas en una chimenea o conducto

El cálculo de la velocidad promedio del gas en una chimenea o conducto, se realiza utilizando la ecuación 3-2 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$v_s = K_p C_p (\sqrt{\Delta p})_{avg} \sqrt{\frac{T_s(avg)}{P_s M_s}} \quad (3-2)$$

Donde:

v_s = Velocidad promedio del gas de chimenea, m/s (pies/s).

K_p = Constante, 34,97 para el sistema métrico (85,49 para el sistema inglés).

$$K_p = 34,97 \frac{m}{s} \left[\frac{\left(\frac{g}{g-mole} \right) (mm Hg)}{(^{\circ}K)(mm H_2O)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{sistema métrico}).$$

C_p = Coeficiente del tubo de Pitot, adimensional.

$(\sqrt{\Delta p})_{avg}$ = Promedio de las raíces cuadradas de cada cabeza de velocidad de gas de chimenea, mm H₂O (in H₂O).

T_s = Temperatura media absoluta del gas de chimenea, °K (°R).

P_s = Presión absoluta del gas de chimenea ($P_{bar} + P_g/13,6$), mm Hg (in Hg).

P_{bar} = Presión barométrica en el sitio de medición, mm Hg (in Hg).

P_g = Presión estática de chimenea, mm H₂O (in H₂O).

M_s = Peso molecular de la pila en base húmeda ($M_d (1 - B_{ws}) + 18,0 B_{ws}$), g/g-mol (lb/lb-mol).

M_d = Peso molecular de la pila en base seca, g/g-mol (lb/lb-mol).

B_{ws} = Vapor de agua en la corriente de gas del Método 4 (método de referencia) o Método 5, proporción por volumen.



b) Tasa volumétrica promedio del flujo de gas seco en la chimenea

$$Q = 3600 (1 - B_{ws})v_s A \left[\frac{T_{std}P_s}{T_{s(abavg)}P_{std}} \right] \quad (3-3)$$

Donde:

- v_s = Velocidad promedio del gas de chimenea, m/s (pies/s).
 B_{ws} = Proporción de vapor de agua, por volumen, en la corriente de gas.
 P_s = Presión absoluta del gas de chimenea ($P_{bar} + P_g/13,6$), mm Hg (in Hg).
 T_{std} = temperatura absoluta estándar, 293 °K (528 °R).
 $T_{s(abavg)}$ = temperatura absoluta promedio de la pila, en °K (°R).

c) Masa molar y la humedad del gas de chimenea

Para calcular la velocidad promedio del gas de chimenea, primero debe obtenerse los valores para la masa molar y humedad (consulte los métodos 3 y método 4 respectivamente). Además, se debe tomar en consideración que, la masa molar del gas de chimenea en base seca (M_d) se corrige a la base húmeda (M_s) usando la fracción de humedad (B_{ws}) con la ecuación 3-4 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$M_s = M_d(1 - B_{ws}) + 18,0B_{ws} \quad (3-4)$$

d) Presión absoluta del gas de chimenea

El resultado de la medición de la presión estática (P_g), debe convertirse el valor de mm H₂O a mm Hg (in H₂O a in Hg) antes de ingresarlo en la ecuación de velocidad como presión absoluta del gas de chimenea. Tomando en consideración que, la densidad del mercurio es 13,6 veces la del agua, la ecuación 3-5 permite la conversión (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



$$P_s = P_{bar} + \frac{P_g}{13,6} \quad (3-5)$$

Donde:

P_s = Presión absoluta del gas de chimenea, mm Hg (in Hg).

P_{bar} = Presión barométrica en el sitio de medición, mm Hg (in Hg).

P_g = Presión estática de chimenea, mm H₂O (in H₂O).

e) Presión barométrica

La presión barométrica (P_{bar}) es obtenida en el sitio por la medición realizada utilizando un barómetro calibrado en el sitio, o poniéndose en contacto con una estación meteorológica cercana (dentro de los 30 km) para obtener la presión de la estación no corregida (estaciones meteorológicas informe la presión barométrica corregida al nivel del mar, debiendo solicitar la presión "no corregida"), además, de que es necesario conocer la elevación de la estación sobre el nivel del mar. Se debe tomar en consideración que la lectura de presión barométrica de la estación debe ser corregida restando 0,832 mm Hg por cada 100 m que la estación está sobre el nivel del mar (0,1 in Hg por cada 100 pies). Para obtener resultados válidos, también es necesario conocer la elevación del sitio de muestreo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

El cálculo de la presión barométrica del sitio de muestreo (P_{bar}) debe ser realizado utilizando la siguiente ecuación 3-6 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$P_{bar} = P_r + 0,001(A - B) \quad (3-6)$$



Donde:

Pr = Presión barométrica al nivel del suelo del sitio o en la estación meteorológica, mm Hg (in Hg).

A = Elevación a nivel del suelo o en la estación meteorológica, m (pies sobre el nivel del mar).

B = Elevación del sitio de muestreo, m (pies sobre el nivel del mar).

f) Cálculo de la tasa de flujo volumétrico

Después de calcular la velocidad promedio del gas de la chimenea (v_s , obtenido mediante los cálculos del método 2), puede encontrar el caudal volumétrico. Para lo cual, se inicia por determinación del área de la chimenea, que en caso de ser circular se la determina con la siguiente ecuación 3-7 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$A_s = \pi \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 \quad (3-7)$$

Donde:

$\pi = 3,14159$.

$D_s =$ Diámetro de una chimenea circular.

En caso de la chimenea sea rectangular se utilizará la ecuación 3-8.

$$A_s = LW \quad (3-8)$$

Donde:

L = Longitud de la chimenea rectangular.

W = Ancho de la chimenea rectangular.



Con los resultados obtenidos mediante la utilización de las fórmulas anteriormente descritas, es posible calcular la tasa de flujo volumétrico del gas de chimenea (real, estándar y estándar seco) mediante las ecuaciones 3-9, 3-10 y 3-11 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Cálculo del caudal volumétrico, real

$$Q_a = 60v_s A_s \quad (3-9)$$

Cálculo del caudal volumétrico, estándar

$$Q_s = K_s v_s A_s \frac{P_s}{T_s} \quad (3-10)$$

Cálculo del caudal volumétrico, patrón seco

$$Q_{sd} = K_s (1 - B_{ws}) v_s A_s \frac{P_s}{T_s} \quad (3-11)$$

Donde:

Q_a = Caudal volumétrico, real, m³/min (acf/min).

v_s = Velocidad promedio del gas de chimenea, m/s (pies/s).

A_s = Área de la pila.

Q_s = Caudal volumétrico, estándar, sm³/min (scf/min).

K_s = Una constante de 21,553 para unidades métricas (1058,8 para unidades inglesas), utilizada para convertir tiempo a minutos y P/T (presión dividida por temperatura) a estándar condiciones

T_s = Temperatura media absoluta del gas de chimenea, °K (°R)

P_s = Presión absoluta del gas de chimenea ($P_{bar} + P_g/13,6$), mm Hg (in. Hg)

P_{bar} = Presión barométrica en el sitio de medición, mm Hg (in. Hg)

P_g = Presión estática de chimenea, mm H₂O (in H₂O)

Q_{sd} = Caudal volumétrico, patrón seco, dsmm³/min (dscf/min)



B_{ws} = Vapor de agua en la corriente de gas (del Método 4 (método de referencia) o Método 5), proporción en volumen

3.7.3. Método 3. Análisis gaseoso del dióxido de carbono, oxígeno, exceso de aire y masa molar

En la formación de las emisiones gaseosas interviene principalmente el proceso de la combustión, este emite básicamente dióxido de carbono y agua en valores porcentuales, mientras que el resto de los constituyentes están muy por debajo de las decenas a miles de partes por millón. El resto es nitrógeno en niveles porcentuales. Muchos de los procesos que no generan emisiones de combustión pueden originar otras especies químicas, generalmente en órdenes de partes por millón, es decir decena de miles, mientras existen procesos como la ventilación que emiten casi exclusivamente aire. Esta apreciación es importante, debido a que las determinaciones a llevarse a cabo para una medición exacta para este tema de interés se refieren exclusivamente al dióxido de carbono y al oxígeno. Recordando que no se considera el vapor de agua debido a que se obtendrá la masa molar en base seca (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Los métodos publicados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) al respecto de este punto en particular son:

- Método 3. Masa molar en base seca
- Método 3A. Instrumental par la determinación de dióxido de carbono y oxígeno.
- Método 3B. Determinación de dióxido de carbono y oxígeno mediante Orsat.
- Método 3C. Determinación de dióxido de carbono, metano, nitrógeno molecular, oxígeno molecular.



En esta sección se está describiendo puntualmente el método 3, para lo cual se especifican tres metodologías de toma de muestras a elección: punto único al azar, punto único, muestreo integrado y puntos múltiples, muestreo integrado. Es una libre elección el uso de uno u otro método.

En el primer caso, el tren de muestreo se conecta directamente al analizador, el cual es del tipo Orsat o Fyrite. La sonda se posiciona en el centro del ducto y se muestrea únicamente en ese punto.

En el segundo caso, la muestra se toma desde el centro del ducto, y posteriormente a la condensación de la humedad, se recibe en una bolsa de Tedlar®, Mylar®, o Teflón®. Para ello, se debe mantener un caudal constante ($\pm 10\%$) y un volumen mínimo de 30 litros. Este análisis debe realizarse antes de las 8 horas (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En el tercer caso, se diferencia del punto de muestreo en los dos casos anteriores, ya que se debe seleccionar la cantidad de puntos de acuerdo con el método 1 de la U.S. EPA. La muestra debe ser tomada de la misma forma que en el caso dos, en el cual el caudal debe ser constante ($\pm 10\%$) y un volumen mínimo de 30 litros. Además, el análisis debe realizarse antes de las 8 horas (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Las determinaciones deben ser realizadas de forma repetida hasta que no difieran una de otra en más de 0,3 g/g-mol. La calibración de los analizadores deberá ser realizada con materiales de referencia gaseosos y se admite un desvío de $\pm 5\%$ respecto del valor del material (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

El lector que requiera profundizar el conocimiento de este método puede descargar el método en formato digital en las referencias bibliográficas en Method 4 — Determination of Moisture Content in Stack Gases.



3.7.3.1. Cálculo de la masa molar en base seca

El cálculo de la masa molar en base seca (M_d) del gas de chimenea es realizado aplicando la ecuación 3-12 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$M_d = 0,44(\%CO_2) + 0,32(\%O_2) + 0,28(\%N_2 + \%CO) \quad (3-12)$$

Donde:

- 0,44 = Masa molar del CO_2 , dividido por 100.
- $\%CO_2$ = Porcentaje de CO_2 por volumen, base seca.
- 0,32 = Masa molar de O_2 , dividido por 100.
- $\%O_2$ = Porcentaje de O_2 por volumen, base seca.
- 0,28 = Masa molar de N_2 o CO , dividido por 100.
- $\%N_2$ = Porcentaje de N_2 por volumen, base seca.
- $\%CO$ = Porcentaje de CO por volumen, base seca.

3.7.4. Método 4. Determinación de humedad

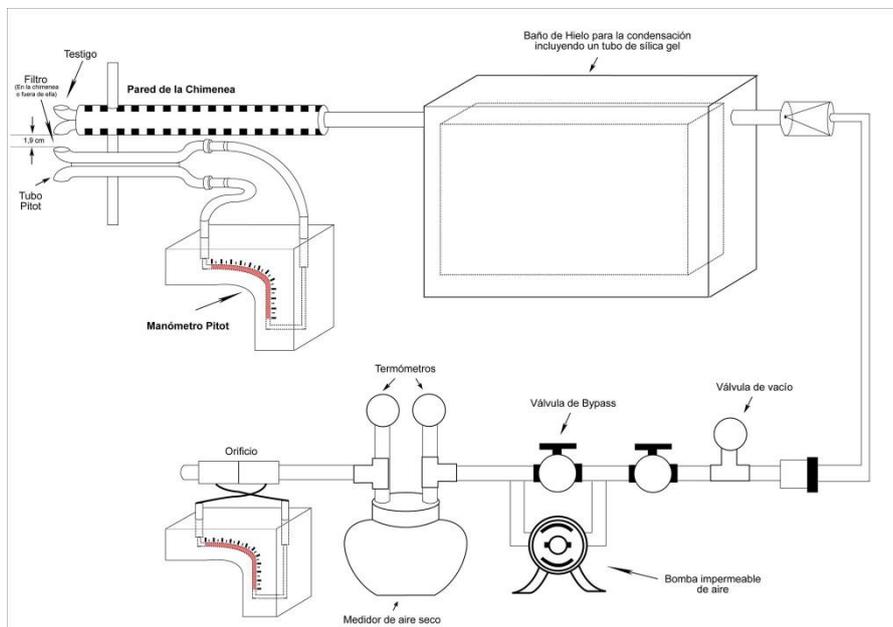
La determinación de la humedad contenida en las emisiones atmosféricas se realiza mediante una técnica sencilla de volumetría o gravimetría. Esta técnica requiere que el muestreo se realice a un caudal constante, para proceder dentro del equipo a una separación de la humedad y su determinación final. Se proponen dos métodos para determinar la humedad: el método de referencia y el método aproximado.

El método de referencia es el más preciso y se utiliza generalmente con la medición simultánea de otros contaminantes. El método aproximado es parte de un paso previo en la determinación de material particulado según los métodos 5 o 17 de la U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 2022). Las normas técnicas permiten el uso de otros métodos aproximados, como el termo higrómetro, cálculos estequiométricos, balances de masa, experiencia previa u otros (Ver Figura 3-6).



Figura 3-6

Esquema del equipo de medición de humedad. Adaptado de Method



Nota. Adaptado de U.S. Environmental Protection Agency (2022)

En el método de referencia es necesario la selección de los puntos de monitoreo de acuerdo con el método 1 de la U.S. EPA. Se selecciona un tiempo de muestreo total para coleccionar un volumen mínimo de $0,60 \text{ m}^3$ a un caudal no mayor de $0,021 \text{ m}^3/\text{min}$, para esto, el caudal debe mantenerse constante ($\pm 10\%$) y en cada punto debe mantenerse el mismo tiempo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

3.7.4.1. Cálculo del contenido de humedad en el gas de chimenea

Para el cálculo del contenido de humedad en el gas de chimenea, en primer lugar, se determina el volumen de la muestra de gas, seguido de la obtención del volumen de la humedad del gas, para finalmente calcular el contenido de humedad en el gas de chimenea (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



a) Cálculo del volumen de la muestra de gas

$$V_{m(std)} = K_3 Y \frac{V_m \left(P_{bar} + \frac{\Delta H}{13,6} \right)}{T_m} \quad (3-13)$$

Donde:

$K_3 =$ 0,3858 °K/mm Hg (unidades métricas), o 17,64 ° R/in. Hg (unidades inglesas).

$Y =$ Factor de calibración del medidor de gas seco.

$V_m =$ Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, dcm (dcf).

$P_{bar} =$ Presión barométrica en el sitio de medición, mm Hg (in. Hg).

$\Delta H =$ Presión promedio del tubo del orificio durante el muestreo, mm H₂O (in H₂O).

$T_m =$ Temperatura absoluta en el medidor de gas seco, ° K (°R).

b) Cálculo del volumen de la humedad del gas

$$V_{wc(std)} = K_2 (W_f - W_i) \quad (3-14)$$

Donde:

$K_2 =$ 0,001335 m³/g (unidades métricas), o 0,04715 pies³/g (unidades inglesas).

$W_f =$ Peso final del agua recolectada, g.

$W_i =$ Peso inicial del agua recolectada, g.

c) Cálculo del contenido de humedad en el gas de chimenea

$$B_{ws} = \frac{V_{wc(std)}}{V_{m(std)} + V_{wc(std)}} \quad (3-15)$$



Donde:

B_{ws} = Proporción de vapor de agua, por volumen, en la corriente de gas.

$V_{m(std)}$ = Volumen de gas de muestra.

3.7.5. Método 5. Determinación del material particulado

Es importante analizar este método debido a que la metodología descrita en esta norma hace uso del muestreo en modo isocinético, que es utilizado en numerosos métodos para determinar contaminantes específicos o, en su caso, para determinar un contaminante en un tipo de industria específica. Aunque el procedimiento puede parecer muy complejo, la práctica permite simplificarlo y utilizar todos los métodos descritos hasta el momento. A continuación, se presentan los pasos necesarios para tomar una muestra con este método 5.

- Determinación de la cantidad de puntos según el Método 1 – U.S. EPA.
- Determinación de la velocidad y temperatura en cada punto según el Método 2 – U.S. EPA.
- Determinación de la masa molar del gas mediante el Método 3 – U.S. EPA.
- Determinación de la humedad del gas mediante el Método 4 – U.S. EPA.
- Determinación del material particulado de forma isocinética mediante el Método 5 – U.S. EPA.

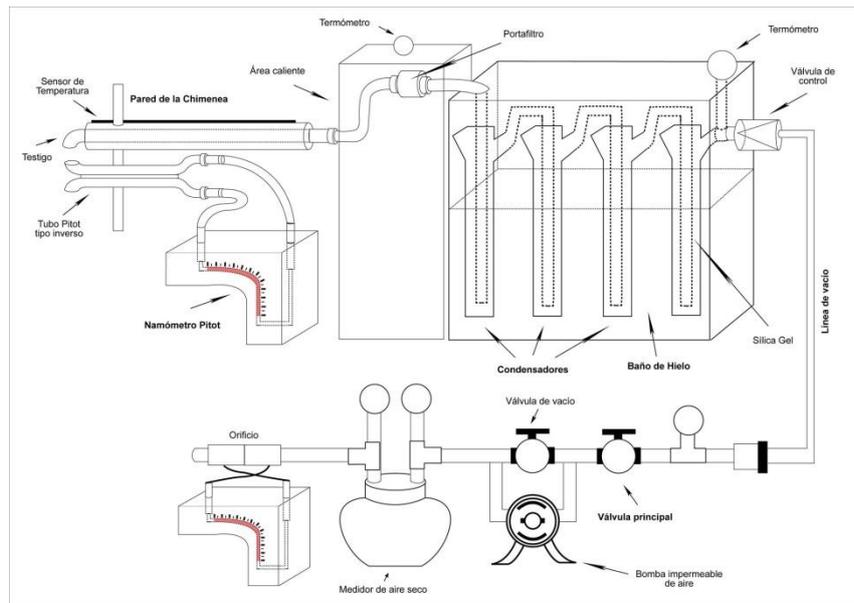
El método 5 tiene en cuenta la selección del tamaño de boquilla de acuerdo con las velocidades medidas, la selección del tamaño de sonda para alcanzar todos los puntos calculados de muestreo, y la selección del tiempo de muestreo, que no debe ser menor a 2 minutos por punto y debe ser el mismo en cada punto de muestreo. Es muy importante realizar un chequeo de posibles fugas en el sistema del tren isocinético una vez terminada la corrida. En caso de superar los límites establecidos para fugas, se debe registrar la fuga para realizar posteriormente la corrección final y



calcular el grado de isocineticidad (I%) (U.S. Environmental Protection Agency, 2022). Para que el muestreo sea aceptable en condiciones de isocinetismo, el grado de isocineticidad debe ser mayor al 90% y menor a 110% (Ver Figura 3-7).

Figura 3-7

Esquema del equipo utilizado para la medición de partículas. Adaptado de Method 5



Nota. Adaptado de U.S. Environmental Protection Agency (2022)

En las referencias bibliográficas el lector puede ver el link respectivo para la descarga digital del método 5, en el mismo que, encontrara al detalle la utilización de este.

3.7.5.1. Cálculo del tamaño de la boquilla de la sonda

La ecuación 3-16 es la más utilizada para calcular el tamaño de la boquilla de la sonda.

$$D_{n(est)} = \sqrt{\frac{K_5 Q_m P_m}{T_m C_p (1 - B_{ws})}} \sqrt{\frac{T_s M_s}{P_s \Delta p_{avg}}} \quad (3-16)$$

Donde:

D_n = Diámetro de la boquilla, mm (in).

K_5 = 0,6071 (unidades métricas) o 0,03575 (unidades inglesas).

Q_m = Lectura del caudal del medidor de prueba, m³/min (pies³/min).

P_m = Presión estática media del medidor de prueba, mm Hg (in Hg)

T_m = Temperatura media del DGM, °K (°R)

C_p = Coeficiente de calibración del tubo de Pitot, adimensional

B_{ws} = Vapor de agua en la corriente de gas (método 4 o alternativo), proporción por volumen

T_s = Temperatura media del gas de chimenea, °K (°R)

M_s = Masa molar del gas de la chimenea, en base húmeda, g/g-mol (lb/lb-mol)

P_s = Presión absoluta de la chimenea o del conducto, mm Hg (in Hg)

Δp_{avg} = Cabeza de velocidad media de los gases de chimenea

3.7.5.2. Cálculo del Factor K

Una vez seleccionada la boquilla adecuada, se debe calcular la relación del factor K de la boquilla utilizada para mantener el isocinetismo en cada punto transversal de la prueba de muestreo. Refiriéndose el factor K como la relación de $\Delta H/\Delta p$ tal que $\Delta H = K\Delta p$. Para lo cual, se debe utilizar la ecuación 3-17 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$K = \frac{\Delta H}{\Delta p} = K_6 D_n^4 \Delta H_{@} C_p^2 (1 - B_{ws})^2 \frac{M_d T_m P_s}{M_s T_s P_m} \quad (3-17)$$

Donde:

ΔH = Presión media del tubo de orificio durante muestreo, mm H₂O (in H₂O).

Δp = Cabeza de velocidad media de los gases de la chimenea.



- $K_6 = 0,0000804$ (unidades métricas) o $849,842$ (unidades inglesas).
- $D_n =$ Diámetro de la boquilla, en mm (in).
- $\Delta H_{@} =$ Factor de calibración del orificio de la consola de muestreo de la fuente.
- $C_p =$ Coeficiente de calibración del tubo de Pitot, adimensional.
- $B_{ws} =$ Vapor de agua en la corriente de gas (método 4 o alternativo), proporción en volumen.
- $M_d =$ Masa molar del gas de chimenea, base seca, g/g-mol (lb/lb-mol).
- $T_m =$ Temperatura media del DGM, °K (°R).
- $P_s =$ Presión absoluta de la chimenea o del conducto, en mm Hg (in Hg).
- $M_s =$ Masa molar del gas de la chimenea o del conducto, base húmeda base húmeda, g/g-mole (lb/lb-mole).
- $T_s =$ Temperatura media del gas de la chimenea, °K (°R).
- $P_m =$ Presión estática media del medidor de prueba de prueba, mm Hg (in Hg).

3.7.5.3. Cálculo de la tasa de muestreo isocinético

El porcentaje medio de muestreo isocinético se calcula mediante la ecuación 3-18 (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

$$\%I = \frac{K_4 T_s V_{m(std)}}{P_s v_s A_n \theta (1 - B_{ws})} \quad (3-18)$$

Donde:

- $K_4 = 4,320$ (unidades métricas) o $0,09450$ (unidades inglesas).
- $T_s =$ Temperatura media absoluta de la chimenea temperatura del gas de la chimenea, °K (°R).
- $V_{m(std)} =$ Volumen de gas de la muestra.
- $P_s =$ Presión absoluta del gas de chimenea de gas de chimenea, en mm Hg (in Hg), calculada con la ecuación
- $P_s = P_{bar} + P_g/13,6$



P_{bar} = Presión barométrica en sitio de medición, mm Hg (in Hg).

P_g = Presión estática de la chimenea, mm H₂O (in H₂O).

v_s = Velocidad media de los gases de la chimenea de la chimenea, m/s (pies/s).

A_n = Área de la sección transversal de la tobera, m² (pies²).

θ = Tiempo de muestreo, en minutos.

B_{ws} = Proporción de vapor de agua, en volumen, en la corriente de gas.

3.8. Muestreo de gases de combustión

Esta sección aborda las técnicas y métodos para analizar tres componentes clave de los gases emitidos durante la combustión: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂). Estos compuestos son de gran importancia debido a su impacto en la calidad del aire y la salud humana. A través de la exposición a métodos de determinación específicos para cada uno de estos gases, el lector aprenderá sobre la toma de muestras y las tecnologías de medición para su adecuada cuantificación, permitiendo la evaluación de la eficiencia en la combustión y el control de las emisiones.

3.8.1. Determinación de monóxido de carbono

La técnica de referencia, para la determinación del monóxido de carbono consiste en la captura del gas y posterior análisis mediante las siguientes técnicas:

- Método EPA 10. Espectrofotometría de infrarrojo.
- Método EPA 10A. Espectrofotometría visible.
- Método EPA 10B. Cromatografía gaseosa FID.

En todos los casos, el muestreo se realiza a caudal constante. Dentro del equipo utilizado, se separan los interferentes como óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno



absorbiéndolos en una solución alcalina de KMnO_4 . Todas las muestras gaseosas recolectadas son analizadas en laboratorio.

El método 10A es un método de referencia que sirve para validar sistemas CEMS en refinerías de petróleo. Específicamente, está indicado para unidades de cracking catalítico. Este método hace uso de captura del CO en un reactivo que, en presencia de sal de plata, forma un complejo que se absorbe en el rango visible de 425 nm o 600 nm, dependiendo de la concentración. Las muestras son recolectadas en bolsas fabricadas de materiales que no permiten que existan interacciones químicas con la misma (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En el método 10B, la muestra es tomada de la misma forma que en el método 10A, y la muestra recolectada en las bolsas se inyecta directamente a un cromatógrafo gaseoso con etapa de reducción catalítica (metanizador) y detección por FID.

3.8.2. Determinación de óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno suelen denominarse NO_x y en esta nomenclatura se hace principalmente referencia a los dos óxidos que se forman a través de los procesos de combustión y todas las variables que intervienen en ellos, es decir, el monóxido y dióxido de nitrógeno. La metodología promulgada por la U.S. EPA se encuentra agrupada en los siguientes métodos:

- Método EPA 7. Espectrofotometría visible.
- Método EPA 7A. Cromatografía iónica.
- Método EPA 7B. Espectrofotometría Ultravioleta Visible.
- Método EPA 7C. Espectrofotometría visible.
- Método EPA 7D. Cromatografía iónica.
- Método EPA 7E. Método instrumental.



Básicamente, los métodos consisten en capturar los óxidos de nitrógeno, muestrearlos a un caudal constante y luego determinarlos en el laboratorio. En el método 7, la muestra se recibe en un frasco evacuado que contiene una solución oxidante y se deja reaccionar durante 16 horas, para luego hacerla reaccionar con una solución absorbente y medir su absorbancia a 410 nm (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En el método 7A, el muestreo es idéntico al método 7, pero una vez oxidados los óxidos de nitrógeno, se determinan mediante cromatografía iónica. En el método 7B, se utiliza lo mismo que en los métodos 7 y 7A en cuanto al muestreo, pero la determinación final se realiza mediante espectrofotometría en el rango de ultravioleta visible, ya que el ion nitrato absorbe en este rango a 210 nm (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En el método 7C, la muestra se hace pasar por unos impinger o borboteadores que contienen un oxidante, de modo que los NO_x se convierten a NO_3^- . Luego se reduce con cadmio a NO_2^- y se hace reaccionar con nitrito de sodio y N-1 naftiletildiamina di cloruro para formar un colorante azoico que se mide a 540 nm (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

En el método 7D, el procedimiento es idéntico al del método 7C, salvo que después de oxidar todos los NO_x a ion nitrato, éste se mide por cromatografía iónica. En el método 7E, se toma la muestra y se mide de forma continua, utilizando el principio de quimioluminiscencia.

3.8.3. Determinación de dióxido de azufre

El dióxido de azufre es un compuesto que se emite en casi todas las reacciones de combustión, salvo para el gas natural. Es la especie oxidada del azufre más estable.



El azufre no se emite como emisión primaria en forma de trióxido de azufre, salvo en plantas de generación de este.

Los métodos previstos por U.S. EPA para la determinación de dióxido de azufre hacen uso del muestreo a caudal constante y la transformación de este a una especie medible fácilmente, como el ion sulfato.

Los métodos de referencia propuestos por U.S. EPA son:

- Método EPA 6. Método volumétrico.
- Método EPA 6A. Método volumétrico.
- Método EPA 6B. Método volumétrico.
- Método EPA 6C. método instrumental.

A excepción del método instrumental, la captura del dióxido de azufre se realiza en una solución oxidante de peróxido de hidrógeno. Previamente, se separan las posibles nieblas de ácido sulfúrico o trióxido de azufre, reteniéndolas en isopropanol (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

El dióxido de azufre es oxidado cuantitativamente a ion sulfato y luego se determina titulándolo con una solución de ion Bario utilizando un indicador denominado Thorin.

En el método 6C, la instrumentación que se indica en el mismo puede ser las técnicas de fluorescencia en el campo de Ultravioleta Visible, espectrofotometría Infrarrojo y espectrofotometría Ultravioleta Visible.



3.9. Métodos de Prueba Condicionales (CTM)

Los Métodos de Prueba Condicionales (CTM) en el contexto de la Evaluación de las Emisiones Contaminantes (EMC), centrándonos en los Métodos Condicionales Históricos. Estos métodos fueron categorizados como CTMs antes de que se revisaran las categorías de métodos y, debido a su importancia y uso en regulaciones y permisos estatales, se creó una categoría específica para ellos (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

3.9.1. Confianza de la EPA en los CTMs

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) evalúa los CTMs en función de la información técnica disponible, como estudios de validación de campo y laboratorio, la comprensión de los problemas más significativos de aseguramiento de calidad (QA) y control de calidad (QC), y la confirmación de que el método aborda adecuadamente estos problemas de QA/QC para identificar cuándo los datos obtenidos podrían no ser representativos. Los procedimientos de QA/QC del método son obligatorios como condición de aplicabilidad (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

3.9.2. CTM-30

El método CTM-30 correspondiente a la Determinación de Óxidos de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y Oxígeno en Emisiones de Motores, Calderas y Calentadores de Proceso a Gas Natural con Analizadores Portátiles, describe un método para determinar las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂) en emisiones controladas y no controladas de motores de combustión interna, turbinas de combustión, calderas y calentadores de proceso a gas natural utilizando analizadores portátiles.



El método es aplicable a la determinación de las concentraciones de NO, NO₂, CO y O₂ en emisiones de motores de combustión interna, turbinas de combustión, calderas y calentadores de proceso a gas natural. Debido a las sensibilidades cruzadas inherentes de las celdas electroquímicas, este método no debe aplicarse a otros contaminantes o fuentes de emisión sin una investigación completa de posibles interferencias analíticas y una evaluación comparativa con otros métodos de prueba de la EPA.

Una muestra de gas se extrae continuamente de una chimenea y se transporta a un analizador portátil para determinar las concentraciones de NO, NO₂, CO y O₂ utilizando celdas electroquímicas. Se proporcionan especificaciones de diseño y rendimiento del analizador y procedimientos de prueba para garantizar datos confiables. Pueden requerirse adiciones o modificaciones a los analizadores suministrados por el proveedor (por ejemplo, línea de muestra calentada, medidores de flujo, etc.) para cumplir con las especificaciones de diseño de este método de prueba.

El rango analítico para cada componente de gas está determinado por el diseño de la celda electroquímica. Se selecciona una parte del rango analítico eligiendo una concentración de gas de calibración cercana a las concentraciones de gas de combustión.

3.9.3. CTM-34

En el monitoreo y control de la contaminación en el aire, es esencial contar con métodos efectivos para medir las emisiones de gases de fuentes fijas, como los equipos de combustión. Uno de estos métodos es el Método de Prueba para la Determinación de Oxígeno, Monóxido de Carbono y Óxidos de Nitrógeno en Fuentes Estacionarias para Monitoreo Periódico, a través del uso de analizadores electroquímicos portátiles.



Este método es aplicable para la determinación de las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂) en emisiones controladas y no controladas de fuentes de combustión utilizando combustibles como el gas natural, el propano, el butano y los aceites combustibles. Este método está diseñado para proporcionar una garantía razonable de cumplimiento mediante el monitoreo o la prueba periódica. No está destinado para su uso donde se requiere un método de prueba de referencia de la EPA. Debido a las sensibilidades cruzadas inherentes de las celdas electroquímicas, este método no debe aplicarse a otros contaminantes o fuentes de emisión sin una investigación completa de posibles interferencias analíticas y una evaluación comparativa con otros métodos de prueba de la EPA.

El principio de la prueba consiste en extraer una muestra de gas de una chimenea y conducirla hacia un analizador electroquímico portátil para la determinación de las concentraciones de gas de NO, NO₂, CO y O₂. Se proporcionan especificaciones de rendimiento y procedimientos de prueba del analizador para garantizar datos confiables. Pueden ser necesarias adiciones o modificaciones de los analizadores suministrados por el proveedor (por ejemplo, líneas de muestra calentadas, termopares, medidores de flujo, etc.) para cumplir con las especificaciones de diseño de este método de prueba. No se permiten cambios que disminuyan el analizador desde la configuración verificada.

3.9.4. OTM-13

Este método es aplicable para determinar las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO_x, NO y NO₂), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂) en emisiones controladas y no controladas de fuentes de combustión utilizando combustibles como el carbón, el gas natural, el propano, el butano y los aceites combustibles destilados. Este método tiene como objetivo proporcionar orientación al usuario de un



instrumento portátil para la monitorización periódica y para garantizar que los resultados de la prueba sean correctos.

El equipo necesario para llevar a cabo esta prueba es un instrumento portátil de bancos ópticos múltiples que utiliza bancos ópticos como infrarrojos no dispersivos (NDIR) y quimioluminiscencia (CLD) para las mediciones de CO y NO_x, respectivamente. Las mediciones de oxígeno se pueden realizar utilizando detectores paramagnéticos, de óxido de circonio o galvánicos. La portabilidad se define como un instrumento y un equipo de acondicionamiento de muestra que pesa menos de 40 libras, lo que permite a una sola persona transportar fácilmente el instrumento sin ayuda.

El principio de la prueba consiste en extraer una muestra de gas de una fuente de combustión mediante una bomba y dirigirla hacia un analizador portátil de bancos ópticos para la determinación de las concentraciones de gas de NO_x (informadas como NO y NO₂ o como NO y NO₂ de manera independiente), CO y O₂. Si es necesario, las concentraciones de gas de CO₂ y SO₂ también se pueden determinar utilizando la misma metodología. No se requiere ni se recomienda la modificación del equipo suministrado por el proveedor, aunque pueden ser necesarios componentes auxiliares, como una línea de muestra caliente, termopares y un pre enfriador de muestra en función de las condiciones específicas del sitio.

3.10. Análisis de errores en el muestreo de chimeneas

El problema de la precisión en las mediciones de muestreo de chimeneas es considerado y debatido en casi todos los informes o artículos en los que se presentan datos de muestreo de chimeneas. Sin embargo, existe un gran malentendido en la comunidad de ingenieros acerca de la diferencia entre error, precisión y exactitud.



Este malentendido con frecuencia lleva a una interpretación equivocada de los estudios analíticos de los métodos de muestreo de chimeneas. El tipo de análisis de errores que se utiliza a menudo solo se aplica al "error distribuido aleatoriamente con una distribución normal sobre el valor verdadero".

El término error es utilizado correctamente con dos significados diferentes y con frecuencia de forma incorrecta para denotar lo que propiamente debería llamarse "discrepancia":

En primer lugar, se utiliza para denotar la diferencia entre un valor medido y el "verdadero". Salvo en algunos casos triviales (como la determinación experimental de la relación entre la circunferencia y el diámetro de un círculo), el valor "verdadero" es desconocido y la magnitud del error es hipotética. No obstante, se trata de un concepto útil para el debate. También se utiliza, cuando se da o implica un número como $\bar{\sigma} = \pm 0,000008 \times 10^{10}$, el "error" se refiere a la incertidumbre estimada en un experimento y se expresa en términos de tales cantidades.

Por otro lado, el término discrepancia corresponde a la diferencia entre dos valores medidos de una cantidad, como la diferencia entre los obtenidos por dos estudiantes, o la diferencia entre el valor encontrado por un estudiante y el dado en un manual o libro de texto. Siendo la palabra "error" usada a menudo correctamente para referirse a tales diferencias.

Los CTMs pueden utilizarse en programas estatales y locales junto con programas aplicables a nivel federal (por ejemplo, permisos del Título V, Planes de Implementación Estatal (SIP)), siempre que estén sujetos a un proceso de aprobación del SIP de la EPA Regional o a la posibilidad de veto de permisos, y con previo aviso público y oportunidad para comentarios. También están disponibles para su aplicación sin supervisión de la EPA en otros usos de programas no relacionados con



la EPA, como programas de permisos estatales y aplicaciones científicas e ingenieriles.

Antes de que una fuente pueda utilizar un CTM para cumplir con los requisitos federales según 40 CFR Parte 60, 61 y 63, el método debe ser aprobado como alternativa. La EPA fomenta la presentación de datos adicionales de campo y laboratorio para respaldar aún más un método.

3.10.1. Clasificación de errores

Los errores pueden ser clasificados en tres grandes grupos los denominados errores sistemáticos, errores aleatorios y errores involuntarios.

a) Errores sistemáticos

Si se llega a la conclusión de que todos los valores individuales están equivocados por la misma cantidad, estos errores se denominan errores sistemáticos o constantes. Por ejemplo, si se utiliza una cinta de acero que tenga un pliegue, todas las medidas realizadas con dicha cinta parecerán demasiado pequeñas en una cantidad igual a la longitud perdida por el pliegue. A continuación, se describen los errores sistemáticos que pueden presentarse en el muestreo de chimeneas:

- Errores de calibración de los instrumentos.
- *Errores personales*: son errores causados por los hábitos de los observadores individuales. Por ejemplo, un observador puede introducir siempre un error al mantener sistemáticamente la cabeza demasiado lejos de la izquierda mientras lee una medición de un medidor mecánico de aguja.



- *Condiciones experimentales*: si un instrumento se utiliza en condiciones experimentales constantes (por ejemplo, de presión o temperatura) diferentes de aquellas para las que fue calibrado, y si no se realiza ninguna corrección, se produce un error sistemático.
- *Técnica imperfecta*: la medición de la viscosidad por la Ley de Poiseuille requiere la medición de la cantidad de líquido que sale de un aparato en un tiempo determinado. Si una pequeña cantidad de líquido salpica fuera del recipiente que se utiliza para recogerlo, se produce un error sistemático.

b) Errores aleatorios

A veces, cuando se repite una medida dada, los valores resultantes no concuerdan exactamente. Las causas del desacuerdo entre los valores individuales deben ser también causas de su diferencia con el valor "verdadero". Los errores resultantes por estas causas se denominan errores aleatorios. También son a veces llamados errores experimentales o accidentales.

En la mayoría de los experimentos, tanto los errores aleatorios como los sistemáticos están presentes. En algunos casos, ambos pueden surgir de la misma fuente. A continuación, se presentan los errores aleatorios que pueden presentarse en el muestreo de chimeneas:

- *Errores de juicio*: la mayoría de los instrumentos requieren una estimación de la fracción de la división más pequeña, y la estimación del observador puede variar en diferentes momentos por diversas razones.
- Condiciones fluctuantes (como la temperatura, la presión o la tensión de la línea).



- *Pequeñas perturbaciones*: por ejemplo, las vibraciones mecánicas o, en los instrumentos eléctricos, la captación de señales espurias procedentes de maquinaria eléctrica rotativa cercana u otros aparatos.
- *Definición*: incluso si el proceso de medición fuera perfecto, las mediciones repetidas de la misma cantidad podrían no coincidir porque esa cantidad podría no estar definida con precisión. Por diversas razones, los bordes no son lisos (al menos si se observan con gran aumento) ni son exactamente paralelos. Por lo tanto, incluso con un dispositivo perfectamente preciso para medir la longitud, el valor varía según el lugar de la sección transversal donde se mide la longitud.

c) Errores involuntarios

Estos errores están casi siempre presentes, al menos en un pequeño porcentaje, en el mejor de los experimentos y deben ser discutidos en un informe escrito. Sin embargo, hay tres tipos de errores evitables que no tienen cabida en un experimento, y el lector entrenado de un informe está justificado al suponer que no están presentes.

- *Errores graves*: se trata de errores causados por equivocaciones absolutas en la lectura de los instrumentos, el ajuste de las condiciones del experimento o la realización de cálculos. Estos errores pueden eliminarse en gran medida con cuidado y repitiendo el experimento y los cálculos.
- *Errores de cálculo*: la maquinaria mecánica seleccionada para calcular los resultados de un experimento, como las reglas de cálculo, las tablas de logaritmos y las máquinas de sumar, debe tener errores lo suficientemente pequeños como para ser completamente despreciables en comparación con los errores naturales del experimento. Por lo tanto, si los datos tienen una precisión de cinco cifras significativas, es muy inapropiado utilizar una regla de cálculo que solo pueda leerse con tres cifras y luego declarar en el informe que el



"error de la regla de cálculo" es una fuente de error. Una regla de cálculo de este tipo solo debe utilizarse para calcular los resultados de un experimento que solo tenga tres o, preferiblemente, dos cifras significativas. Por otro lado, si el experimento da cinco cifras significativas, deben utilizarse logaritmos de cinco o seis posiciones, tablas u otros medios de cálculo más precisos.

- *Errores caóticos*: si los efectos de las perturbaciones se vuelven excesivamente grandes, es decir, grandes en comparación con los errores aleatorios naturales, se denominan errores caóticos. En tales situaciones, el experimento debe interrumpirse hasta que se elimine la fuente de la perturbación.



CAPÍTULO 4

Legislación ambiental vigente
aplicada

CAPÍTULO 4 LEGISLACIÓN AMBIENTAL VIGENTE APLICADA

4

La norma máxima en materia ambiental en nuestro país es el Código Orgánico del Ambiente, ley orgánica publicada en el Suplemento del Registro Oficial No. 983 el 12 de abril de 2017, cuya vigencia inició 12 meses después, es decir, el 12 de abril de 2018. En su Libro Tercero correspondiente a "De la Calidad Ambiental", en el Título III referente a "Control y Seguimiento Ambiental", en su Capítulo IV "Monitoreo y Seguimiento", el Artículo 208 describe la responsabilidad del operador en cuanto al monitoreo de emisiones y su cumplimiento con los parámetros definidos en la normativa ambiental. Además, la Autoridad Ambiental Componente se reserva el derecho de realizar el seguimiento mediante la solicitud al operador de la realización de monitores de estas.

En el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, norma que desarrolla y estructura la normativa necesaria para aplicar las disposiciones del Código Orgánico del Ambiente, se dispone en su Artículo 486 referente a "Muestreo" que la responsabilidad recae en el operador para cumplir con el plan de manejo ambiental y determinar la calidad ambiental de las emisiones entre otros aspectos. Además, se señala que los muestreos deben realizarse de acuerdo con las normativas vigentes y las normas o estándares aceptados internacionalmente. Asimismo, se establece que los sitios de muestreo deben ser adecuados y el operador debe prestar las facilidades necesarias para su realización. En el Artículo 487 de la misma norma, referente a las "Inspecciones", se dispone que los funcionarios de la Autoridad responsable en materia ambiental pueden tomar muestras de emisiones entre otros aspectos.



4.1. Normativa regional para la gestión de la contaminación atmosférica

Colombia

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia ha implementado la Estrategia Nacional de Calidad del Aire con el objetivo de mejorar y preservar la calidad del aire, evitar y reducir el deterioro del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y mejorar la calidad de vida de la población. De acuerdo con lo presentado por esta institución, la estrategia pone énfasis en la reducción del material particulado en áreas urbanas y se desarrolla en un marco nacional de gobernanza con líneas de acción específicas. Uno de los objetivos de la Estrategia Nacional de Calidad del Aire es fortalecer y actualizar los instrumentos normativos y técnicos que favorezcan la reducción de emisiones a la atmósfera.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible también ha identificado la necesidad de reducir los impactos producidos por el ruido y los olores ofensivos. Por ello, ha adoptado la Resolución 1541 de 2013 y la Resolución 2087 de 2014, que reglamentan los niveles máximos permisibles de emisión de olores ofensivos y establecen los procedimientos de medición y los Programas de Reducción de Impactos por Olores Ofensivos (PRIO). Además, se ha elaborado guías para la mitigación de olores ofensivos en los sectores avícola y porcícola y se encuentra en actualización la Resolución 627 de 2006, que establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2023).

En la resolución 909 de 2008, se presenta los estándares de emisión admisibles para actividades industriales, definidas en el artículo 6 de la presente resolución. Los valores se presentan en base a condiciones de referencia, que son 25 °C y 760 mm Hg, con un oxígeno de referencia del 11%. Los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales son los siguientes:



Material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos de flúor Inorgánico (HF), compuestos de cloro inorgánico (HCl), hidrocarburos totales (HCT), dioxinas y furanos, neblina ácida o trióxido de azufre expresados como H₂SO₄, plomo (Pb), cadmio (Cd) y sus compuestos, cobre (Cu) y sus compuestos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2023).

La regulación de la calidad del aire en Colombia se establece en el Título 5 del Decreto 1076 de 2015. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la Resolución 2254 de 2017, donde se establece los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio, que incluyen material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y monóxido de carbono (CO) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2023).

El monitoreo de estos contaminantes es responsabilidad de las Autoridades Ambientales, quienes implementan Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) siguiendo los criterios definidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en 2018 operaron 27 SVCA a nivel nacional, conformados por 203 estaciones de monitoreo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2023).

Perú

El Ministerio del Ambiente de Perú, se basa en instrumentos de gestión de la calidad del aire, los que pueden ser clasificados en dos categorías:

- a) Instrumentos técnicos: incluyen planes, guías, protocolos, manuales y otros documentos similares.



b) Instrumentos normativos: comprenden Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), así como sus respectivas modificaciones.

Estos instrumentos serán utilizados por las entidades de los tres niveles de gobierno como herramientas de control, prevención, fiscalización y mitigación de riesgos a la salud y al ambiente.

Los ECA son indicadores que establecen concentraciones máximas de contaminantes en el aire que no representan riesgos significativos para la salud de las personas ni para el ambiente. Estos estándares son aplicables en todo el territorio del país y deben ser cumplidos por todas las actividades industriales, comerciales, de transporte y de servicios (Ministerio del Ambiente de Perú, 2023).

A continuación, se presenta las principales normas relacionadas con los ECA en Perú, ordenadas cronológicamente:

- DS N° 074-2001-PCM: Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire.
- DS N° 069-2003-PCM: Establecen valor anual de plomo.
- DS N° 009-2003-SA: Aprueban el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire.
- DS N° 003-2008-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental de Aire.
- DS N° 006-2013-MINAM: Disposiciones complementarias para aplicación de los ECA.

Los LMP son indicadores que establecen las concentraciones máximas de emisiones contaminantes que pueden ser liberadas al ambiente por las actividades industriales y comerciales. Estos límites son aplicables a nivel nacional y deben ser



cumplidos por todas las actividades sujetas a regulación (Ministerio del Ambiente de Perú, 2023).

A continuación, se presenta las principales normas relacionadas con los LMP en Perú, clasificadas por sector:

- LMP Actividad Cemento: DS N° 003-2002-PRODUCE y DS N° 001-2020-MINAM.
- LMP Actividades Minero-Metalúrgicas: RM N° 315-96-EM-VMM.
- LMP Harina y Aceite de Pescado
- DS N° 143-2021-MINAM. Aprueban el Protocolo de medición de radiaciones no ionizantes en los sistemas eléctricos de corriente alterna.
- DS N° 150-2021-MINAM. Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental para Aire de los parámetros cadmio, arsénico y cromo en material particulado menor de diez micras (PM10).
- DS N° 155-2021-MINAM. Aprueban los Límites Máximos Permisibles para emisiones atmosféricas de las actividades de fabricación de ladrillos.
- RM N° 164-2021-MINAM. Aprueban el proyecto de Lineamientos para la elaboración, implementación y evaluación de los Programas de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.
- RM N° 170-2021-MINAM. Aprueban el proyecto de Lineamientos para la elaboración y aprobación de los Protocolos de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.
- DS N° 172-2021-MINAM. Aprueban el Plan Nacional de Electromovilidad y sus lineamientos de política para el periodo 2021 – 2030.
- RM N° 187-2021-MINAM. Disponen la publicación del proyecto de Decreto Supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire de los parámetros compuestos orgánicos volátiles (COV) y su Exposición de Motivos.



- DS N° 190-2021-MINAM. Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire de los parámetros compuestos orgánicos volátiles (COV).
- RM N° 195-2021-MINAM. Aprueban el proyecto de Lineamientos para la elaboración, implementación y evaluación de los Programas de Monitoreo de Emisiones Atmosféricas.
- RM N° 198-2021-MINAM. Aprueban el proyecto de Lineamientos para la elaboración y aprobación de los Protocolos de Monitoreo de Emisiones Atmosféricas.

Bolivia

Algunas actividades estratégicas para abordar la problemática de la contaminación atmosférica en Bolivia incluyen:

- Inventarios de emisiones: Identificar y cuantificar las fuentes de emisión de contaminantes, como el parque automotor, responsable de más del 70% de la contaminación atmosférica en Bolivia.
- Seguimiento y control de emisiones: Centros de diagnóstico vehicular para revisar el estado mecánico y controlar las emisiones de los vehículos, y regulación de fuentes fijas a través de la Ley de Medio Ambiente N° 1333.
- Seguimiento y control de inmisiones: Redes de monitoreo de contaminantes atmosféricos para proporcionar información sobre la calidad del aire en áreas específicas.
- Legislación ambiental: Actualizar y adaptar la legislación ambiental específica a la realidad de Bolivia.
- Participación inclusiva y responsabilidades: Involucrar a instituciones como Gobierno Nacional, Gobiernos Departamentales, Gobiernos Municipales, Policía Nacional, Universidades y ONGs en una red de control adecuada.
- Difusión, socialización, sensibilización y educación: Fomentar la participación y aceptación de la población mediante campañas constantes.



- Indicadores de impacto: Generar indicadores contundentes de los efectos obtenidos con las medidas aplicadas.

En Bolivia, los contaminantes atmosféricos están regulados por la Norma Boliviana NB 62011:2008 del Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). Los principales contaminantes criterio incluyen monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado con diámetro menor a 10 micrómetros (PM₁₀), dióxido de azufre (SO₂), material particulado con diámetro menor a 2,5 micrómetros (PM_{2,5}), plomo (Pb) y partículas totales en suspensión (PTS). Cada uno de estos contaminantes tiene efectos perjudiciales en la salud humana y el medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2023).

Los límites máximos permisibles para los contaminantes atmosféricos en Bolivia se establecen en el Anexo 1 del Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RMCA) de la Ley de Medio Ambiente N° 1333 y en la Norma Boliviana NB 62011:2008 de IBNORCA (Ministerio del Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2023).

Para monitorear la calidad del aire en centros urbanos estratégicos de Bolivia, se emplean tres métodos principales: pasivo, activo y automático. El método pasivo es simple y económico, y se utiliza para determinar las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) y ozono troposférico (O₃) en la Red MoniCA Bolivia. El método activo, que requiere energía eléctrica, se emplea para medir partículas menores a diez micrómetros de diámetro (PM₁₀). El método automático, que combina la recolección y el análisis de muestras en un solo instrumento, se utiliza para el monitoreo continuo de diferentes contaminantes en la mayoría de las ciudades de la Red MoniCA Bolivia (Ministerio del Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2023).



4.2. Normativa ecuatoriana de emisiones al aire desde fuentes fijas

La norma nacional ambiental aplicada a las emisiones provenientes de chimeneas de fuentes fijas que está vigente en el momento en que se publica esta obra corresponde al Anexo III del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente – Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas. Esta norma se encuentra dentro del Acuerdo Ministerial 097A, publicado en la Edición Especial del Registro Oficial No. 387 el 4 de noviembre de 2015.

La finalidad de esta norma es preservar la salud pública, la calidad del aire ambiente, las condiciones de los ecosistemas y del ambiente en general. Para lograrlo, se establecen límites permisibles de la concentración de emisiones de contaminantes del aire, los cuales se encuentran separados en tablas de acuerdo con la fuente de combustión y, dentro de cada una, se encuentran subdivididas en función al tipo de combustible utilizado. El cumplimiento de esta norma se lleva a cabo mediante el establecimiento de estos límites permisibles.

4.2.1. Fuentes fijas significativas

Se consideran fuentes fijas significativas aquellas que emplean combustibles fósiles sólidos, líquidos, gaseosos, sus combinaciones o biomasa, y cuya potencia calorífica sea igual o mayor a 3 MW o diez millones de unidades térmicas británicas por hora (10×10^6 BTU/h). Estas fuentes deben demostrar el cumplimiento de los límites máximos permitidos de emisión al aire establecidos en esta norma, mediante mediciones de la tasa de emisión de contaminantes. En caso de superar los valores máximos permitidos, deben implementar métodos o instalar equipos de control necesarios para alcanzar el cumplimiento de la norma.



4.2.2. Fuentes fijas no significativas

Se consideran fuentes fijas no significativas aquellas que emplean combustibles fósiles sólidos, líquidos, gaseosos o sus combinaciones, y cuya potencia calorífica sea menor a 3 MW o diez millones de unidades térmicas británicas por hora (10×10^6 BTU/h). Estas fuentes, aceptadas como no significativas por la Autoridad Ambiental de Control, no están obligadas a realizar mediciones de emisiones. Sin embargo, deben demostrar el cumplimiento de la normativa a través de una de las siguientes alternativas:

- a) Mantener un registro interno de cumplimiento de prácticas de mantenimiento de equipos de combustión, conforme a los programas establecidos por el operador, propietario o fabricante del equipo, aprobados por la Autoridad Ambiental de Control.
- b) Presentar certificados del fabricante del equipo de combustión sobre la tasa esperada de emisión de contaminantes, en función de las características del combustible utilizado. Estos certificados serán válidos durante el período de vida útil, en función de la garantía del fabricante. Alternativamente, se puede presentar un estudio específico aprobado por la Autoridad Ambiental de Control en lugar del certificado.
- c) Utilizar la altura de chimenea recomendada por las prácticas de ingeniería y otros criterios establecidos por la Autoridad Ambiental de Control.

4.2.3. Límites máximos permisibles

La selección de los límites aplicados a una fuente toma en consideración el año de la autorización de entrar en funcionamiento de las fuentes fijas, de la siguiente forma:



- a) Fuente fija existente: con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero de 2003.
- b) Fuente fija existente: con autorización de entrar en funcionamiento desde enero de 2003 hasta fecha publicación de la reforma de la norma, es decir hasta el 4 de noviembre de 2015.
- c) Fuente fija nueva: con autorización de entrar en funcionamiento a partir fecha publicación de la reforma de la norma, es decir desde el 4 de noviembre de 2015.

Se hace esta división de acuerdo con el año de la autorización de entrar en funcionamiento de la fuente fija debido a que estos equipos mejoran en eficiencia y disminuyen la concentración de contaminantes emitidos a medida que la tecnología avanza con el paso del tiempo.

Es necesario realizar la verificación de los límites permisibles presentados con los resultados de las concentraciones de los contaminantes obtenidos del monitoreo. Para ello, estos deben ser corregidos con el porcentaje de oxígeno dados en la norma para cada una de las fuentes de combustión, así como, a condiciones normales, las mismas que corresponden a 760 mm Hg de presión y cero grados centígrados (0 °C), en base seca.

La Ecuación 4-1 permite corregir las concentraciones de emisión obtenidas del monitoreo de emisiones atmosféricas en una chimenea en fuentes fijas, previo a la verificación del cumplimiento de los límites permisibles establecidos en la norma ambiental vigente (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



$$Ec = \frac{21 - Oc}{21 - Om} Em \quad (4-1)$$

Donde:

Ec = Concentración de emisión corregida (mg/Nm³) en base seca.

Em = Concentración de emisión medida (mg/Nm³) en base seca.

Oc = Porcentaje de oxígeno (O₂) de corrección (%).

Om = Porcentaje de oxígeno (O₂) medido en la chimenea (%).

La norma ambiental también define mediante la Ecuación 4-2, el diámetro equivalente para chimeneas de cualquier tipo de sección, el cual deberá ser utilizado para los cálculos respectivos necesarios para cumplir con lo dispuesto en la norma (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

$$De = \frac{4Af}{Pi} \quad (4-2)$$

Donde:

De = Diámetro equivalente.

Af = Área de flujo.

Pi = Perímetro interno.

Para la identificación en esta norma, de los límites máximos permisibles de los contaminantes de emisiones atmosféricas de fuentes fijas presenta la siguiente clasificación:

a) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para fuentes fijas de combustión abierta.

Los límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire para fuentes fijas de combustión abierta (en mg/Nm³) están divididos en dos categorías: fuentes fijas existentes con autorización de funcionamiento previa a la publicación de la reforma y fuentes fijas nuevas con autorización a partir de la fecha de publicación de la reforma.

Los contaminantes incluidos son:

○ *Material particulado*

Se establece un límite de 200 mg/Nm³ para fuentes existentes y 100 mg/Nm³ para fuentes nuevas, tanto para combustibles sólidos sin contenido de azufre como para fuel oil.

○ *Óxidos de nitrógeno (NO_x)*

Los límites varían según el tipo de combustible, siendo 150 mg/Nm³ para fuentes existentes y 80 mg/Nm³ para fuentes nuevas en caso de diésel; 800 mg/Nm³ para fuentes existentes y 650 mg/Nm³ para fuentes nuevas en caso de sólidos sin contenido de azufre; y 700 mg/Nm³ para fuentes existentes y 600 mg/Nm³ para fuentes nuevas en caso de fuel oil.

○ *Dióxido de azufre (SO₂)*

Los límites son 200 mg/Nm³ para fuentes existentes y 180 mg/Nm³ para fuentes nuevas en caso de gases; 1,650 mg/Nm³ tanto para fuentes existentes como



nuevas en caso de fuel oil; y 700 mg/Nm³ para ambos tipos de fuentes en caso de diésel.

Los valores en mg/Nm³ corresponden a miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales (760 mm Hg de presión y temperatura de 0 °C), en base seca y corregidos al 18% de oxígeno (O₂). Además, se menciona que sólidos sin contenido de azufre incluyen combustibles como la madera y el bagazo.

b) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para calderas.

Los límites máximos permisibles de concentración de emisión de contaminantes al aire para calderas, clasificados según el tipo de combustible y la fecha de autorización de funcionamiento de la fuente fija, se establecen en tres categorías de fuentes fijas: con autorización de funcionamiento antes de enero de 2003, con autorización de funcionamiento desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma, y con autorización de funcionamiento a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma.

Los contaminantes incluidos son:

○ *Material particulado*

Los límites varían según el tipo de combustible, siendo 430 mg/Nm³ para fuentes con autorización antes de enero de 2003, 180 mg/Nm³ para fuentes con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma, y 142 mg/Nm³ para fuentes nuevas.



○ *Óxidos de nitrógeno (NO_x)*

Los límites varían según el tipo de combustible y se establecen en 1330 mg/Nm³ para fuentes con autorización antes de enero de 2003, 1030 mg/Nm³ para fuentes con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma, y 614 mg/Nm³ para fuentes nuevas en el caso de combustible sólido fósil (coke); 850 mg/Nm³, 670 mg/Nm³ y 434 mg/Nm³, respectivamente, en el caso de fuel oil y crudo de petróleo; y 600 mg/Nm³, 486 mg/Nm³ y 302 mg/Nm³, respectivamente, en el caso de diésel y gases como GLP o GNP.

○ *Dióxido de azufre (SO₂)*

Los límites son 2004 mg/Nm³ tanto para fuentes con autorización antes de enero de 2003 como para fuentes con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma, y 600 mg/Nm³ para fuentes nuevas, independientemente del tipo de combustible (coke, fuel oil, crudo de petróleo o diésel).

Los valores en mg/Nm³ corresponden a miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales (760 mm Hg de presión y temperatura de 0 °C), en base seca y corregidos al 4% de oxígeno (O₂).

c) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para turbinas a gas.

Para aplicar correctamente los límites establecidos para el Dióxido de azufre, es necesario realizar un análisis del contenido de azufre en el combustible empleado, paralelamente al análisis de las emisiones.

Los límites máximos permisibles de concentraciones de emisión al aire para turbinas a gas, medidos en miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones



normales (mg/Nm^3 ; es decir, a 760 mm Hg de presión y 0 °C de temperatura, en base seca y corregidos al 15% de oxígeno) se detallan a continuación:

- *Material particulado en combustible líquido:*
 - Fuente fija existente con autorización previa a enero de 2003: $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
 - Fuente fija existente con autorización entre enero de 2003 y la fecha de publicación de la reforma: $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
 - Fuente fija nueva con autorización después de la fecha de publicación de la reforma: $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$

- *Óxidos de nitrógeno en combustible líquido:*
 - Fuente fija existente con autorización previa a enero de 2003: $400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
 - Fuente fija existente con autorización entre enero de 2003 y la fecha de publicación de la reforma: $165 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
 - Fuente fija nueva con autorización después de la fecha de publicación de la reforma: $165 \text{ mg}/\text{Nm}^3$

- *Óxidos de nitrógeno en combustible gaseoso:*
 - Fuente fija existente con autorización previa a enero de 2003: $300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
 - Fuente fija existente con autorización entre enero de 2003 y la fecha de publicación de la reforma: $125 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
 - Fuente fija nueva con autorización después de la fecha de publicación de la reforma: $125 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.



○ *Dióxido de azufre (SO₂)*

Los límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de dióxido de azufre para combustibles líquidos, como diésel, kerosene y naftas, son de 700 mg/Nm³ para fuentes fijas existentes con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero de 2003, 700 mg/Nm³ para fuentes fijas existentes con autorización de entrar en funcionamiento desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma, y 235 mg/Nm³ para fuentes fijas nuevas con autorización de entrar en funcionamiento a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma.

Es importante destacar que los valores máximos permisibles de concentraciones de emisión indicados son en mg/Nm³, lo que significa miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, a 760 mm Hg de presión y temperatura de cero grados centígrados (0 °C), en base seca y corregidos al 15% de oxígeno (O₂).

d) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para motores de combustión interna.

Los límites máximos permisibles de concentraciones de emisión al aire para motores de combustión interna (mg/Nm³), discriminada por contaminante, tipo de combustible y fuente emisora:

○ *Material particulado*

Combustible: Líquido (Fuel oil - crudo petróleo)

- Fuente fija existente (autorizada antes de enero de 2003): 350 mg/Nm³



- Fuente fija existente (autorizada entre enero de 2003 y la reforma de la norma): 150 mg/Nm³
- Fuente fija nueva (autorizada a partir de la reforma de la norma): 100 mg/Nm³

Combustible: Líquido (Diesel)

- Fuente fija existente (autorizada antes de enero de 2003): 350 mg/Nm³
 - Fuente fija existente (autorizada entre enero de 2003 y la reforma de la norma): 150 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva (autorizada a partir de la reforma de la norma): 125 mg/Nm³
- *Óxidos de nitrógeno*

Combustible: Líquido (Fuel oil)

- Fuente fija existente (autorizada antes de enero de 2003): 2.300 mg/Nm³
- Fuente fija existente (autorizada entre enero de 2003 y la reforma de la norma): 2.000 mg/Nm³
- Fuente fija nueva (autorizada a partir de la reforma de la norma): 1.900 mg/Nm³

Combustible: Líquido (Diesel)

- Fuente fija existente (autorizada antes de enero de 2003): 2.300 mg/Nm³
- Fuente fija existente (autorizada entre enero de 2003 y la reforma de la norma): 2.000 mg/Nm³
- Fuente fija nueva (autorizada a partir de la reforma de la norma): 1.900 mg/Nm³



Combustible: Gaseoso

- Fuente fija existente (autorizada antes de enero de 2003): 2.300 mg/Nm³
 - Fuente fija existente (autorizada entre enero de 2003 y la reforma de la norma): 2.000 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva (autorizada a partir de la reforma de la norma): 1.900 mg/Nm³
- *Dióxido de azufre*

Combustible: Líquido (Fuel oil)

- Fuente fija existente con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero de 2003: 1.500 mg/Nm³
- Fuente fija existente con autorización de entrar en funcionamiento desde enero de 2003 hasta fecha publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³
- Fuente fija nueva con autorización de entrar en funcionamiento a partir de la fecha publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³

Combustible: Líquido (Crudo petróleo)

- Fuente fija existente con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero de 2003: 1.500 mg/Nm³
- Fuente fija existente con autorización de entrar en funcionamiento desde enero de 2003 hasta fecha publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³
- Fuente fija nueva con autorización de entrar en funcionamiento a partir de la fecha publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³



Combustible: Líquido (Diesel)

- Fuente fija existente con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero de 2003: 1.500 mg/Nm³
- Fuente fija existente con autorización de entrar en funcionamiento desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³
- Fuente fija nueva con autorización de entrar en funcionamiento a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³

Es importante destacar que los valores máximos permisibles de concentraciones de emisión indicados son en mg/Nm³, lo que significa miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, a 760 mm Hg de presión y temperatura de cero grados centígrados (0 °C), en base seca y corregidos al 15% de oxígeno (O₂).

e) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para la producción de cemento.

Los límites máximos de concentraciones de emisión al aire para la producción de cemento se expresan en miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales (mg/Nm³), es decir, a una presión de 760 mm Hg y una temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos al 10% de oxígeno (O₂).

Los contaminantes y sus respectivos límites máximos de concentraciones de emisión al aire para cada tipo de fuente fija son:



- *Partículas totales*
 - Horno rotatorio: 120 mg/Nm³ (antes de 2003), 62,8 mg/Nm³ (2003 hasta la reforma), 50 mg/Nm³ (nuevas fuentes).
 - Enfriador de Clinker: 80 mg/Nm³ (antes de 2003), 62,8 mg/Nm³ (2003 hasta la reforma), 50 mg/Nm³ (nuevas fuentes).
 - Molienda de Clinker: 150 mg/Nm³ (antes de 2003), 100 mg/Nm³ (2003 hasta la reforma), 50 mg/Nm³ (nuevas fuentes).

- *Óxidos de nitrógeno* (gases de combustión de horno rotatorio): 1.400 mg/Nm³ (antes de 2003), 1.300 mg/Nm³ (2003 hasta la reforma), 1.100 mg/Nm³ (nuevas fuentes).

- *Dióxido de azufre* (gases de combustión de horno rotatorio): 800 mg/Nm³ (antes de 2003), 600 mg/Nm³ (2003 hasta la reforma), 470 mg/Nm³ (nuevas fuentes).

Además, según la norma:

- Todas las cementeras existentes deben instalar un sistema de monitoreo continuo de las emisiones de combustión del horno de clinker en un periodo no mayor a 4 años a partir de la vigencia de la norma.

- El monitoreo continuo debe cubrir al menos el 90% del periodo anual, y los registros de monitoreo deben estar disponibles de manera permanente para la Autoridad Ambiental de Control.

- Las plantas de cemento que co-procesen desechos peligrosos en sus hornos deben cumplir con las condiciones y límites de emisión establecidos en el Acuerdo No 048 del 29 de marzo de 2011. Este acuerdo expide la Norma Técnica para el Co procesamiento de Desechos Peligrosos en Hornos



Cementerios, que establece los estándares y requisitos específicos para la gestión y tratamiento de dichos desechos en la industria del cemento.

f) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para la producción de vidrio y fibra de vidrio.

Los límites máximos de concentraciones de emisión al aire para la producción de vidrio y fibra de vidrio se encuentran expresados en miligramos por metro cúbico (mg/Nm^3). Los datos están clasificados según el tipo de fuente fija y la fecha de autorización para entrar en funcionamiento. A continuación, se presenta la información de manera formal:

○ *Partículas totales:*

- Fuente fija existente con autorización antes de enero de 2003: $250 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
- Fuente fija existente con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: $200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
- Fuente fija nueva con autorización a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: $160 \text{ mg}/\text{Nm}^3$

○ *Óxidos de nitrógeno (NO_x):*

- Fuente fija existente con autorización antes de enero de 2003: $1.200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
- Fuente fija existente con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: $1.000 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
- Fuente fija nueva con autorización a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: $800 \text{ mg}/\text{Nm}^3$



- *Dióxido de azufre (SO₂)*
 - Fuente fija existente con autorización antes de enero de 2003: 1.800 mg/Nm³
 - Fuente fija existente con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 1.500 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva con autorización a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 1.200 mg/Nm³

- *Fluoruro de hidrógeno (HF)*
 - Fuente fija existente con autorización antes de enero de 2003: 15 mg/Nm³
 - Fuente fija existente con autorización desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 15 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva con autorización a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 12 mg/Nm³

- *Ácido clorhídrico (HCl)*
 - Fuente fija existente antes de enero de 2003: 50 mg/Nm³
 - Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 50 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 40 mg/Nm³

- *As (arsénico) + Co (cobalto) + Ni (níquel) + Se (selenio) + Cr (VI) (cromo hexavalente) + Pb (plomo) + Cr (III) (cromo trivalente) + Cu (cobre) + Mn (manganeso)*
 - Fuente fija existente antes de enero de 2003: 6 mg/Nm³



- Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 6 mg/Nm³
- Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 5 mg/Nm³

Las concentraciones se expresan en mg/Nm³, lo que significa miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, es decir, a 760 mm Hg de presión y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos al 7% de oxígeno (O₂).

g) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para bagazo en equipos de combustión de instalaciones de elaboración de azúcar.

Los límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire para el bagazo en equipos de combustión de instalaciones de elaboración de azúcar. Estos límites se expresan en miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales (mg/Nm³) y varían según el contaminante y la fecha en que la fuente fija recibió autorización para entrar en funcionamiento.

Los límites máximos permisibles de concentraciones de emisión para cada contaminante y categoría de fuente fija son los siguientes:

○ *Material particulado*

- Fuente fija existente antes de enero de 2003: 300 mg/Nm³
- Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 150 mg/Nm³
- Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 120 mg/Nm³



○ Óxidos de nitrógeno

- Fuente fija existente antes de enero de 2003: 900 mg/Nm³
- Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 850 mg/Nm³
- Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 700 mg/Nm³

Las concentraciones se expresan en mg/Nm³, lo que significa miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, es decir, a 760 mm Hg de presión y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos al 12% de oxígeno (O₂).

h) Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión de contaminantes al aire establecidos para la fundición de metales.

Los límites máximos de concentraciones de emisión al aire para la fundición de metales, expresados en miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales (mg/Nm³), varían según el contaminante, la fecha en que la fuente fija recibió autorización para entrar en funcionamiento y el tipo de horno utilizado.

Los límites máximos de concentraciones de emisión para partículas totales en diferentes tipos de hornos y categorías de fuente fija son los siguientes:

○ *Cubilotes y hornos de 1 a 5 t/h*

- Fuente fija existente antes de enero de 2003: 600 mg/Nm³
- Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 250 mg/Nm³



- Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 50 mg/Nm³, 30 mg/Nm³ si hay presencia de metales pesados
- *Cubilotes y hornos > 5 t/h*
 - Fuente fija existente antes de enero de 2003: 300 mg/Nm³
 - Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 150 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 50 mg/Nm³, 30 mg/Nm³ si hay presencia de metales pesados
- *Hornos de arco eléctrico < 5 t*
 - Fuente fija existente antes de enero de 2003: 350 mg/Nm³
 - Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 250 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 50 mg/Nm³, 30 mg/Nm³ si hay presencia de metales pesados
- *Hornos de arco eléctrico > 5 t*
 - Fuente fija existente antes de enero de 2003: 150 mg/Nm³
 - Fuente fija existente desde enero de 2003 hasta la fecha de publicación de la reforma de la norma: 120 mg/Nm³
 - Fuente fija nueva a partir de la fecha de publicación de la reforma de la norma: 50 mg/Nm³, 30 mg/Nm³ si hay presencia de metales pesados

Las concentraciones se expresan en mg/Nm³, lo que significa miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, es decir, a 760 mm Hg de presión y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos al 7% de oxígeno (O₂).



Si el lector está interesado en revisar una de las tablas de los límites permisibles, puede consultar el Acuerdo Ministerial 097A en la tabla de interés del Anexo III. En caso de existir varias fuentes en las que el mismo propietario y/o operador es responsable y se encuentren dentro de la misma instalación, se utiliza lo que se denomina esquema de burbuja, que permite calcular la concentración de la emisión global mediante la Ecuación 4-3 (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

$$C_{global} = \frac{A_1E_1 + A_2E_2 + \dots + A_iE_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i} \quad (4-3)$$

Donde:

C_{global} = Concentración de emisión global para el conjunto de fuentes fijas de combustión.

A_i = Factor de ponderación que puede ser el consumo de combustible de la fuente i, o el caudal de gases de combustión de la fuente i.

E_i = Concentración de emisión determinada para la fuente i.

4.3. Norma ISO/IEC 17025

Se debe tomar en consideración que, para los monitoreos externos de emisiones de fuentes fijas, debe ser realizado por laboratorios ambientales con acreditación vigente con la norma ISO/IEC 17025 (Código Orgánico del Ambiente, 2017).

La norma ISO/IEC 17025 es un estándar internacional que establece los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración para asegurar que sus procesos y resultados son confiables y precisos. La norma fue desarrollada por la International Organization for Standardization (ISO) y la International



Electrotechnical Commission (IEC) y se publicó por primera vez en 1999, siendo su última versión la 2017. La norma ISO/IEC 17025 es un estándar específico para laboratorios de ensayo y calibración, mientras que otras normas ISO abordan una amplia variedad de temas y áreas de aplicación. Por ejemplo, la norma ISO 9001 es un estándar de sistemas de gestión de la calidad que se aplica a una amplia variedad de organizaciones y se centra en mejorar la eficiencia y efectividad de sus procesos.

La norma ISO 14001 es un estándar de sistemas de gestión ambiental que se enfoca en la gestión de los impactos ambientales de una organización y en la mejora continua de su desempeño ambiental.

La comisión encargada de la norma ISO/IEC 17025 es la ISO/CASCO (Committee on Conformity Assessment), la cual es una comisión técnica de la ISO encargada de desarrollar estándares y directrices relacionadas con la evaluación de la conformidad y la certificación de sistemas de gestión. La norma ISO/IEC 17025 fue desarrollada por el grupo de trabajo CASCO/WG 24, que se encarga de los estándares de laboratorio. La norma se revisa y actualiza regularmente para asegurar que sigue siendo relevante y adecuada para el campo de la ensayo y calibración.

La norma ISO/IEC 17025 se aplica a laboratorios de ensayo y calibración que realizan ensayos y calibraciones en una amplia variedad de campos, como la química, la biología, la física, la tecnología de los alimentos, la medición y la ingeniería. Todos estos laboratorios deben cumplir con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025 para garantizar que sus resultados sean precisos y fiables. Además, estos laboratorios pueden optar por solicitar la acreditación de sus actividades según esta norma. La acreditación es un proceso voluntario en el que un laboratorio es evaluado por un organismo de acreditación independiente, en nuestro país la institución responsable es el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE), quien verifica que un laboratorio cumple con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025. La acreditación es una forma



de demostrar la competencia y la confiabilidad de un laboratorio y puede ayudar a mejorar su reputación y credibilidad en el mercado.

En la anterior versión de la norma, a la actual 2017, la norma decía que solamente se aplicaba para aquellos laboratorios que realizan actividades de ensayo y laboratorios que realizan actividades de calibración. Sin embargo, en esta nueva definición de laboratorio se incluye la actividad de muestreo, por lo que se permite incorporar la actividad de muestreo a un laboratorio de acuerdo con la norma 17025. Sin embargo, existe una restricción y dice que el laboratorio sí puede hacer el muestreo siempre y cuando esté asociado a un ensayo, lo que aplica a todos los parámetros de emisiones atmosférica y calidad de aire.

Los resultados que se entregan por los laboratorios, a los clientes sean internos o externos, deben ser adecuados para su uso y servir al cliente para tomar una decisión. A menudo, se habla de que los laboratorios son organismos evaluadores de conformidad, aunque los laboratorios pueden no conocer o no sentirse así. Sin embargo, los laboratorios son en efecto organismos evaluadores de conformidad, sean internos o externos. Esto implica evaluar si cumple o no con una legislación, en este caso en materia ambiental o con una reglamentación aplicada específica. Por lo tanto, los laboratorios son organismos evaluadores de conformidad.

Al ingresar en la página oficial del Servicio de Acreditación Ecuatoriano, y la revisión de cada uno de los organismos evaluadores de la conformidad, se presentará el Alcance de la Acreditación para cada uno, en el cual consta, el tipo de organismo, la categoría, campo de ensayo, producto o material a ensayar, ensayo, técnica y rangos, así como el método de ensayo, constando en este último el método interno, es decir el método que el laboratorio utilizará y el método de referencia respectivo.



4.4. Norma de Calidad de Aire Ambiente

La norma nacional ambiental aplicada a la calidad del aire ambiente, que está vigente en la fecha en que se publica esta obra, corresponde al Anexo IV del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente - Norma de Calidad de Aire Ambiente o Nivel de Inmisión, que se encuentra dentro del Acuerdo Ministerial 097A, publicado en la Edición Especial del Registro Oficial No. 387, el 4 de noviembre de 2015.

Esta norma establece los objetivos de calidad del aire ambiente, los límites permisibles de los contaminantes criterio y contaminantes no convencionales del aire ambiente, y los métodos y procedimientos para la determinación de los contaminantes en el aire ambiente.

Su objetivo es la preservación de la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de ecosistemas y del ambiente en general. Se cumple mediante el establecimiento de los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente a nivel del suelo.

Esta norma define a los siguientes contaminantes criterio del aire ambiente:

- a) Partículas Sedimentables
- b) Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 μm , a este se lo representa como PM_{10}
- c) Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 μm , representado por $\text{PM}_{2,5}$
- d) Dióxido de nitrógeno, NO_2
- e) Dióxido de azufre, SO_2
- f) Monóxido de Carbono, CO



g) Ozono, O₃

Además, esta norma define como contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o carcinogénicos a:

a) Benceno (C₆H₆)

b) Cadmio (Cd)

c) Mercurio inorgánico (vapores) (Hg)

Los resultados obtenidos de las concentraciones de contaminantes criterio del aire deben ser corregidos en función de las condiciones de referencia, que son 25 °C y 760 mm Hg, y deben estar de acuerdo con las condiciones locales en las que se han realizado las mediciones. Para ello, se utiliza la Ecuación 4-5.

$$Cc = Co \frac{760 \text{ mm Hg} (273 + t^{\circ}C)^{\circ}K}{Pbl \text{ mm Hg} 298^{\circ}K} \quad (4-5)$$

Donde:

Cc = Concentración corregida.

Co = Concentración observada.

Pbl = Presión atmosférica local, en milímetros de mercurio.

t°C = Temperatura local, en grados centígrados.

La norma establece concentraciones máximas permitidas para los contaminantes criterios en el aire ambiente, que dependen del tiempo de muestreo. Estas concentraciones máximas tienen valores específicos para los contaminantes criterios en tiempos de muestreo de una hora, 8 horas, 24 horas y un año. Si se desea conocer estas concentraciones máximas permitidas, se deberá consultar el Acuerdo Ministerial 097A en el Anexo IV.



La norma también establece niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire, que se detallan en la Tabla 4-1. Estos niveles implican responsabilidades para el seguimiento y establecimiento del nivel para las instituciones acreditadas ante el Sistema Único de Manejo Ambiental. Este último es el sistema que traslada las responsabilidades del Ministerio responsable en materia ambiental a otras instituciones.

Los niveles establecidos en esta norma permiten conocer y prevenir los efectos negativos de las altas concentraciones de los contaminantes criterios, que podrían provocar la muerte en caso de concentraciones muy elevadas de uno o varios de estos contaminantes. La norma establece la necesidad de adoptar medidas en función del nivel, a través de planes de acción, que permitan determinar, autorizar, limitar o prohibir actividades en la zona afectada con el fin de preservar la salud de la población.

Tabla 4-1.

Concentraciones de contaminantes criterio que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire

Contaminante	Periodo de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de Carbono	Concentración promedio en ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15000	30000	40000
Ozono	Concentración promedio en ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	400	600
Dióxido de Nitrógeno	Concentración promedio en una hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1000	2000	3000
Dióxido de Azufre	Concentración promedio en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	1000	1800
Material particulado PM_{10}	Concentración promedio en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	250	400	500
Material Particulado $\text{PM}_{2,5}$	Concentración promedio en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	150	250	350

Nota. Adaptado de Acuerdo Ministerial 097A, 2015



Los niveles de alerta se activan cuando la concentración del contaminante supera el valor establecido en la tabla. Por ejemplo, si el promedio de concentración de monóxido de carbono en ocho horas es de 15000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o más, se activa el nivel de alerta. Si la concentración continúa aumentando y supera el valor establecido en la tabla para la alarma, se activa el nivel de alarma. Si la concentración supera el valor establecido para la emergencia, se activa el nivel de emergencia.

4.5. Normativa aplicada a modelos de dispersión

El Ministerio del Ambiente ha establecido en su Texto Unificado de Legislación Secundaria en el Anexo 3 del Libro VI, numeral 4.4., que para los Estudios de Impacto Ambiental se pueden utilizar modelos simplificados o detallados para evaluar las emisiones de aire desde fuentes fijas. El enfoque detallado es más preciso en la evaluación de incrementos en los niveles de contaminación y requiere información meteorológica horaria con al menos un año de registros que provenga de estaciones ubicadas cerca de las chimeneas. Estas estaciones deben cumplir con los requisitos de la Organización Meteorológica Mundial. Si el proyecto es suficientemente grande, se pueden instalar estaciones meteorológicas en los sitios donde se ubicarán las chimeneas, ya sea por iniciativa del proponente o por la Autoridad Ambiental de Control. La información meteorológica debe ser procesada con herramientas informáticas que permitan su uso en el modelo detallado.

Para calcular el impacto en las concentraciones promedio a lo largo de 8 horas, 24 horas y un año, se multiplican las máximas concentraciones horarias obtenidas con el enfoque simplificado por 0,75, 0,45 y 0,1, respectivamente, y se suman a las concentraciones de línea base en periodos de 8 horas, 24 horas y un año. Las concentraciones de línea base deben tomar en cuenta la zona con los mayores niveles de contaminación existentes. A continuación, se comparan las concentraciones totales con los niveles establecidos en la Norma de Calidad del Aire Ambiente (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Para evaluar el impacto de las fuentes fijas de combustión con el enfoque detallado, se pueden utilizar modelos de transporte químico en tres dimensiones. Si, a pesar de cumplir con los límites de emisión establecidos en la norma, los resultados de la evaluación detallada muestran que los incrementos en los niveles de contaminación comprometen el cumplimiento de la Norma de Calidad del Aire Ambiente, el proponente debe considerar otras opciones para reducir las emisiones, como el uso de dispositivos de control eficientes en la captura de contaminantes o el uso de combustibles menos contaminantes (Acuerdo Ministerial 061, Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



CAPÍTULO 5

Gestión de la calidad del aire

CAPÍTULO 5 GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

5

La creciente conciencia ambiental en los últimos años debido al aumento de los efectos dañinos de los contaminantes ambientales en diferentes países del mundo ha llevado a la promulgación de políticas que permitan medir y controlar estos contaminantes. Este proceso se ha visto impulsado por el avance técnico y científico en los métodos de medición de los contaminantes del aire, que cada vez son más precisos y rápidos. Sin embargo, estos esfuerzos pueden resultar inútiles si no se implementa un Sistema Articulado de Gestión Ambiental.

Existen diferentes modelos que los países han adoptado para involucrar diversos componentes relacionados con la medición, seguimiento y control de la calidad del aire, como modelos para la predicción de posibles episodios llamados Air Quality Management System (AQMS) o Sistemas de Gestión de Calidad del Aire.

Los AQMS consideran aspectos como la identificación y medición de la fuente de emisión, la creación de modelos de simulación y estudio de dispersión de contaminantes, la determinación de la calidad del aire, el estudio de los riesgos ambientales en cuanto a la salud mediante el cálculo y evaluación, la determinación de los efectos negativos y daños de la contaminación, la determinación y análisis del costo ambiental, la identificación de opciones de mitigación, la evaluación del costo-beneficio de las opciones de mitigación, la implementación de regulaciones y medidas de control y la articulación de programas educativos (Mitchell & Sweeney, 2018).



Los beneficios de utilizar un Sistema de Gestión de Calidad del Aire incluyen conocer en detalle los procesos que afectan a las emisiones, sus consecuencias en la calidad del aire y la posibilidad de mejorar su control. Esto permite aumentar la eficiencia de los procesos antropogénicos con una reducción en el impacto ambiental atmosférico.

5.1. Instrumentos de gestión de la calidad del aire

En muchas de las ciudades de nuestro país no se ha implementado algún Sistema de Gestión de Calidad del Aire. Sin embargo, en la mayoría de ellas se han desarrollado y ejecutado muchos instrumentos de administración de la calidad del aire que, en gran parte de los casos, son elementos constituyentes de este tipo de sistemas. A continuación, se presentan las acciones de mitigación más comúnmente implementadas:

En el sector transporte, se ha llevado a cabo la sustitución de la gasolina con contenido de plomo por una que no lo contenga. Además, se ha promulgado una normativa mínima en cuanto a las emisiones, se han implementado programas de inspección vehicular, se han establecido normativas para la utilización de convertidores catalíticos en vehículos y se han desarrollado programas de mejoramiento en los sistemas de transporte público y de manejo de tráfico.

En el sector eléctrico, se ha logrado una disminución de emisiones contaminantes mediante el cambio de matriz energética y el mejoramiento de la eficacia energética. En el sector industrial, se ha optimizado el proceso en base a la utilización de tecnologías limpias y la prevención de la polución. También se ha implementado el cobro por emisiones generadas y se lleva a cabo un seguimiento y control riguroso de las normas de emisión. En otros sectores, se realiza un control y prevención rigurosos de incendios, así como fiscalización y control de incineración de basureros ilegales.



5.2. Implementación de un sistema de gestión de calidad del aire

En esta sección se describen las etapas necesarias que deberían adoptarse para la implementación de un Sistema de Gestión de Calidad del Aire.

Inventario de emisiones

La primera etapa consiste en obtener un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la zona de estudio. Un inventario de emisiones se refiere a las cantidades de contaminantes que se liberan en la atmósfera en un período determinado, normalmente un año. Este estudio debe cubrir todas las fuentes presentes en la zona definida. La elaboración adecuada de un inventario de emisiones debe proporcionar la ubicación, magnitud, frecuencia, duración y contribución relativa de estas emisiones. Cabe destacar que los inventarios de emisiones no tienen en cuenta las reacciones atmosféricas que se producen en presencia de los contaminantes. La importancia de la utilización de los inventarios de emisiones radica en que permite planificar de forma precisa los sistemas de gestión y redes de control de la calidad del aire (Grijalbo Fernández, 2016).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica determina las siguientes etapas para la elaboración de un inventario de emisiones: identificación y clasificación de las fuentes de emisiones, así como de sus contaminantes en las zonas geográficas definidas; identificación y recopilación de información de los factores de emisión de cada fuente y contaminante identificado; información base sobre las unidades de producción en dependencia de las fuentes individuales identificadas, donde se presente información sobre los materiales o combustibles utilizados para realizar la combustión; realización del cálculo de las tasas de emisión para cada contaminante atmosférico, expresado en base anual; y suma del total de emisiones contaminantes específicas para cada una de las categorías de las fuentes identificadas (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



Es importante considerar que los inventarios de emisiones deben ser actualizados periódicamente debido a la incorporación de nuevas fuentes, además de que las emisiones generadas por una fuente pueden variar. Para una mejor comprensión, se puede decir que un inventario de emisiones puede llevarse a cabo en las siguientes etapas: preliminares del inventario, recopilación de información, estimación de emisiones, desarrollo de la base de datos, control, aseguramiento de la calidad y análisis de la incertidumbre.

Preliminares del inventario

Está compuesto por las subetapas como: fijar el alcance y objeto del inventario, descripción geográfica, descripción temporal, contaminantes a ser inventariados y clasificación de fuentes de emisión.

Recopilación de información

Esta etapa está compuesta por: informes de autoridades ambientales, informes de autoridades de tránsito, encuestas y otra información de fuentes secundaria estatales y privadas.

5.3. Estimación de emisiones

A continuación, se describen algunas metodologías para realizar la estimación de emisiones.

Sistemas de Monitoreo Continuo (CEMS)

La técnica de CEMS (por sus siglas en inglés Continuous Emission Monitors), consiste en la utilización de sistemas de monitoreo en línea con toma de muestras en períodos cortos, monitoreando y almacenando la muestra durante el funcionamiento del equipo.



Muestreo de fuentes

Esta técnica consiste en la toma de muestras en chimenea y/o ductos en las cuales se obtiene tasas de emisión a partir de muestreos en un período de tiempo corto. Lo interesante de esta técnica es que los resultados son utilizados para extrapolarlos a otras fuentes de características similares o para la realización de estimaciones de largo plazo.

Balance de masa

La determinación de emisiones con esta técnica se basa en calcularlas a partir de los materiales que ingresan al proceso y luego calcular la cantidad de emisiones que sale del proceso como parte del producto.

El balance de masa se centra en la cuantificación del flujo de un material que ingresa y sale de un proceso, donde las diferencias entre la entrada y la salida se asumen como descargas al ambiente. Es importante tener en cuenta que esta técnica se utiliza cuando los flujos de entrada y salida están claramente identificados. De igual forma, puede ser utilizada para un componente individual de un proceso o para todos los componentes del flujo del proceso.

Las estimaciones de emisiones obtenidas por esta técnica dependen de los datos utilizados para su cálculo, por lo que son extremadamente sensibles. Pequeños errores en los datos de los parámetros de cálculo (presión, temperatura, concentración del flujo, caudal, eficiencias en los controles, etc.) pueden dar lugar a errores significativos en la cantidad de emisiones estimadas.



Factores de emisión

Los factores de emisión de un contaminante consisten en obtener la relación entre las emisiones generadas y la cantidad de material procesado o la cantidad de combustible utilizado, lo cual permite obtener un factor numérico que, al multiplicarse por cualquiera de estas dos actividades, en las que las cantidades pueden calcularse fácilmente, da como resultado la cantidad de emisiones generadas por el proceso.

Esta técnica es muy difundida a nivel mundial y una de las herramientas de estimación más utilizadas, por lo que existen diferentes fuentes de consulta donde se pueden obtener los factores de emisión para determinados procesos. Estos factores han sido obtenidos por grupos de industrias, actividades económicas y procesos específicos.

Los factores de emisión han sido clasificados de acuerdo con su grado de precisión en las clasificaciones A, B, C, D y E, siendo la clasificación A la de mayor grado de precisión y la E la de más baja precisión. La precisión de los factores de emisión está dada por el análisis de fuentes con características similares.

Análisis de combustibles

Esta técnica es un proceso de evaluación de la composición química de los combustibles, ya sea sólidos, líquidos o gaseosos. Este análisis se lleva a cabo para determinar las propiedades físicas y químicas de los combustibles, así como para medir su calidad y su potencial de generación de energía. Se fundamenta en la aplicación de leyes de la conservación de masa, de lo cual, los flujos de la emisión pueden ser estimado en función de la presencia de los componentes que pueden generarla y que se encuentran en los combustibles utilizados.



Modelos de estimación de emisiones

Esta técnica de estimación consiste en la utilización de ecuaciones matemáticas empíricas desarrolladas para procesos y tipos de fuentes específicas. A continuación, se describen brevemente los modelos más conocidos para la estimación de emisiones:

- *FIRE*: consiste en una base de datos constituida de factores de emisión recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (U.S.EPA), en los cuales constan de datos para la estimación de contaminantes criterio y contaminantes peligrosos.
- *PM CALCULATOR*: este modelo permite la estimación de material particulado de fuentes puntuales.
- *TANKS*: este modelo permite estimar los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y los contaminantes peligrosos (HAPs) de tanques fijos o flotantes.
- *LANDFILL*: modelo utilizado para la estimación de emisiones que provienen de rellenos sanitarios.
- *WATER9*: este modelo de estimación permite calcular las emisiones generadas de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- *BEIS*: modelo de estimación que permite la estimación de emisiones biogénicas.
- *COPERTIII*: COPERTIII es un modelo europeo de estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles.
- *IVE*: modelo de estimación de emisiones de fuentes móviles en países en desarrollo.
- *MOBILE6*: modelo americano de estimación de emisiones generadas por fuentes móviles.
- *PART5*: modelo de estimación de emisiones de material particulado generadas por fuentes móviles.



5.3.1. Jerarquización de los métodos de estimación de emisiones

Como se ha podido observar en párrafos anteriores, existe un gran número de métodos de estimación de emisiones y su utilización depende de los datos disponibles para aplicar el método, del presupuesto y de la existencia de un método para el tipo de fuente y emisión objeto de estudio. Además, puede ser que todos los métodos puedan ser aplicados a una fuente determinada, lo que plantea la pregunta de cuál de estos métodos es el más preciso, de esto se obtiene la siguiente jerarquía:

1. Método de estimación de emisiones.
2. Extrapolación.
3. Factores de emisión basado en censos.
4. Balance de masa.
5. Encuestas.
6. Factores de emisión basado en procesos.
7. Modelación de emisiones.
8. Muestreo en la fuente.

La confianza en el cálculo y los costos de los métodos de estimación de emisiones son crecientes, siendo el Método de Estimación de Emisiones (1), el de menor confianza y costo, y finalizando el Muestreo en el Fuente (8) como el de mayor confianza y costo en el cálculo (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

5.3.2. Desarrollo de la base de datos

La base de datos debe estar diseñada para poder ser actualizada en caso de aparición de nuevas fuentes o modificación de las existentes. En la actualidad, es necesario contar con la opción de exportar los datos ingresados a un Sistema de Información Geográfico (SIG), para tener un control y seguimiento mucho más preciso. Asimismo, la base de datos debe proporcionar la suma de emisiones de cada



uno de los contaminantes para cada categoría de fuentes especificada, así como realizar el cálculo total de emisiones para el espacio de tiempo definido, que suele corresponder a un año.

5.3.3. Control y aseguramiento de la calidad

El control y aseguramiento de la calidad en un inventario de emisiones se refiere a un conjunto de procesos y procedimientos sistemáticos diseñados para garantizar la precisión, la confiabilidad y la integridad de los datos y los resultados de un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) o contaminantes atmosféricos.

El control de calidad implica el uso de técnicas y herramientas para verificar la exactitud de los datos y resultados, así como la evaluación de la integridad y la coherencia de los datos de entrada y de los modelos utilizados en el inventario. Esto puede incluir la verificación de los datos de origen, la validación de los factores de emisión y la revisión de los procedimientos y supuestos utilizados en el cálculo de las emisiones.

El aseguramiento de la calidad se centra en la prevención de errores o inexactitudes en el inventario a través del establecimiento de políticas y procedimientos de calidad, y la realización de controles internos y revisiones periódicas para garantizar la conformidad con las normas y estándares aplicables. Esto puede incluir la documentación de los procedimientos de calidad, la capacitación de los empleados, la implementación de sistemas de control de calidad y la realización de auditorías internas y externas.

En conjunto, el control y aseguramiento de la calidad en un inventario de emisiones son importantes para garantizar la precisión, confiabilidad e integridad de los datos y resultados del inventario. Esto proporciona una base sólida para la toma



de decisiones informadas en la política ambiental, así como para la evaluación del progreso y el desempeño en la reducción de emisiones de GEI o contaminantes atmosféricos.

5.3.4. Análisis de incertidumbre

En un inventario es necesario determinar la incertidumbre de sus datos debido a que, los inventarios de emisiones se renuevan y actualizan constantemente, por lo que se necesita tomar en consideración dichos datos.

Este es un proceso sistemático que tiene como objetivo cuantificar y comprender las incertidumbres asociadas a las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) o contaminantes atmosféricos en un inventario. Este análisis permite evaluar la fiabilidad de los resultados del inventario y proporcionar información útil para la toma de decisiones en materia de política ambiental.

El análisis de incertidumbre se lleva a cabo mediante el uso de técnicas estadísticas y matemáticas para evaluar la variabilidad y la incertidumbre en los datos de entrada y en los modelos utilizados para estimar las emisiones. Se pueden identificar y cuantificar diferentes tipos de incertidumbres, como la variabilidad en las fuentes de datos, la incertidumbre en los factores de emisión o la incertidumbre en la actividad económica.

El resultado del análisis de incertidumbre es un rango de valores de emisiones estimadas con una determinada probabilidad de estar dentro de ese rango. Esta información es valiosa para los responsables políticos y otros interesados en el inventario, ya que permite comprender mejor la confiabilidad de los resultados y la incertidumbre asociada a las estimaciones.



5.3.5. Diseño de la red de monitoreo y meteorología

Para el diseño de una red de monitoreo y meteorología, se deben tomar en cuenta las siguientes etapas imprescindibles: determinar los objetivos de la red, identificar el área objeto de estudio, realizar un estudio detallado de la dispersión de contaminantes, definir los parámetros a ser medidos y con ello definir el número total de estaciones de monitoreo, determinar el tipo de red de monitoreo e identificar los sensores meteorológicos necesarios para cumplir con los objetivos de la red de monitoreo (Grijalbo Fernández, 2016).

Los datos meteorológicos pueden agruparse en datos que presentan las características generales de dispersión de la contaminación atmosférica, información que permite describir cualitativamente la dispersión de los contaminantes atmosféricos de acuerdo con las fuentes de procedencia del proyecto o actividad e información necesaria para utilizar modelos matemáticos que determinen la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

5.3.6. Operación de la red de monitoreo de calidad del aire

Dentro de las actividades que son llevadas a cabo para la operación de la red de monitoreo están el estabilizar los datos de la red de monitoreo, establecer e implementar un sistema de control y aseguramiento de calidad, identificar e implementar los índices necesarios de calidad de aire y realizar un estudio detallado del microclima del área o zona de estudio.



5.4. Sistemas QA/QC para la calidad del aire

5.4.1. Definición de aseguramiento de calidad

Control de calidad

El control de la calidad, también conocido como control interno de calidad, se refiere a las técnicas operacionales y actividades que se llevan a cabo para garantizar la calidad de un producto o servicio. Una de las técnicas más simples y utilizadas es el uso de chequeos, que pueden incluir procedimientos normales como muestreos controlados, calibraciones periódicas y chequeos dobles, entre otros.

Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad, también conocido como control de calidad externo, se refiere a las acciones planificadas o sistemáticas que son necesarias para dar la confianza esperada a un producto o servicio. Estas acciones se realizan ocasionalmente, generalmente por una persona ajena a quien desempeña la rutina normal de la operación. Algunos ejemplos de acciones de aseguramiento de la calidad incluyen comparaciones entre varios laboratorios, inspección del sistema en el sitio, y la evaluación periódica de los datos de control interno, entre otras actividades (Parker, 2021).

5.4.2. Elementos de aseguramiento de calidad

A continuación, se describen brevemente los elementos que intervienen en el aseguramiento de la calidad.



Documento control

Para implementar un procedimiento de aseguramiento de la calidad, es necesario cumplir con los siguientes procedimientos: procedimiento de muestreo, procedimiento de calibración, procedimientos analíticos, procedimientos de análisis de datos, validación y reporte, procedimiento de desempeño y auditoría del sistema, mantenimiento preventivo, plan de aseguramiento de la calidad y proyectos de aseguramiento de la calidad (Parker, 2021).

Objetivos y políticas de aseguramiento de la calidad

Los objetivos y las políticas para el aseguramiento de la calidad deben ser definidos por cada organización y deben ser escritos y difundidos a todo el personal responsable de llevar a cabo las actividades de cada proceso a realizar.

En cuanto a la calidad del aire, los objetivos generales están enfocados en obtener datos íntegros, precisos, exactos, representativos e intercomparables, con el fin de reducir los costos de la calidad.

Organización

El aseguramiento de la calidad en la organización incluye actividades como la planificación y la identificación de problemas en el aseguramiento de la calidad, así como la implementación de un plan de aseguramiento de la calidad y la designación de responsabilidades y actividades para cada cargo. Además, se deben establecer objetivos de aseguramiento de la calidad para cada sistema de medición, y se debe identificar la entidad y el personal necesario para el soporte del aseguramiento de la calidad. Por último, se debe desarrollar una hoja de ruta para el aseguramiento de la calidad en áreas como la red de monitoreo, los procedimientos de laboratorio, la validación de datos y el mantenimiento de equipos y la calibración (Parker, 2021).



Planeación de la calidad

Planificar la calidad en mediciones de contaminación de aire permite obtener datos con calidad aceptable a un costo razonable. Esta planificación incluye todas las actividades de un sistema de medición, como la toma de la muestra, el análisis de la muestra, el procesamiento de datos, el equipo asociado y el personal: operadores y analistas.

Para desarrollar la planificación de calidad es necesario responder preguntas como: ¿Qué actividades se deben considerar?, ¿Cuáles son las actividades más críticas?, determinar los límites de aceptabilidad de las actividades, ¿Con qué frecuencia se deben verificar y chequear las actividades?, determinar los métodos de medida a utilizar para la verificación de las actividades y acciones a tomar en caso de superar los rangos de aceptabilidad (Parker, 2021).

Entrenamiento

Cada uno de los integrantes del equipo que interviene en las actividades de medición de contaminación del aire debe estar capacitado y entrenado en los objetivos de calidad y responsabilidad en función de las actividades que desempeñe. Regularmente, las capacitaciones deben realizarse en función del tiempo de apropiación de los conocimientos.

Preparación de la red

Este ítem se refiere a cada uno de los aspectos del diseño de la red de monitoreo, así como a la elección y prueba correcta de los sitios de muestreo, ya que esto es fundamental para la obtención de datos representativos y de alta calidad. Los elementos de diseño más importantes de este tipo de redes son el tamaño de la red de



monitoreo, la localización de las estaciones de muestreo, el examen del sitio y la selección de los métodos y equipos de muestreo.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo tiene su eficacia en mantener y proteger la integridad de los datos. Este elemento del aseguramiento de la calidad debe consolidarse en un programa continuo de mantenimiento preventivo, donde se presentarán los repuestos y consumibles que deberán permanecer en stock para prevenir la suspensión de las operaciones por un posible reemplazo de estos elementos.

Recolección de la muestra

La recolección de la muestra puede realizarse mediante un pre-muestreo y un post-muestreo, los cuales pueden hacerse de forma manual, es decir, por un operador, o mediante un sistema de muestreo automático. Además, es muy importante realizar verificaciones del equipo durante el muestreo. Se debe tener en cuenta que el tratamiento de la muestra en el post-muestreo es fundamental para su representatividad y calidad, y se deben hacer gráficas de control para registrar cualquier novedad durante la recolección de la muestra.

Análisis de la muestra

El analista debe realizar chequeos de control con el objetivo de determinar el desempeño del sistema analítico y estimar la variabilidad de los resultados desde el sistema analítico en términos de precisión. Es necesario llevar gráficas de control para determinar cuando el sistema o procedimientos analíticos no funcionan adecuadamente y sea necesario tomar medidas correctivas.



Reporte de errores en los datos

Los errores humanos son la fuente más común de errores en el reporte de datos, por lo que se deberán utilizar procedimientos de validación de datos para identificar los niveles operacionales y de análisis. Por ejemplo, si un técnico de laboratorio registra accidentalmente un valor incorrecto de una medición, podría afectar la precisión de los datos y, por lo tanto, la calidad de los informes finales.

Para evitar este tipo de errores, se deben establecer procedimientos de validación de datos, que incluyan la revisión regular de los datos por parte de personal capacitado, así como el uso de gráficas de control para identificar cualquier desviación en los datos recopilados.

Las gráficas de control son herramientas útiles para identificar errores sistemáticos y aleatorios en los datos. Estas gráficas pueden mostrar cómo los datos cambian con el tiempo y si existen valores que están fuera de los límites esperados. Si se detecta una desviación significativa en los datos, se deben tomar medidas para identificar la causa del error y corregirlo para garantizar que los datos sean precisos y confiables.

Control de calidad

Este ítem se refiere a la calidad de los equipos de muestreo o monitoreo. Es importante revisar opiniones e intercambiar experiencias con otros usuarios de equipos para evaluar la calidad, el soporte y otras ventajas de los equipos seleccionados. Además, se debe realizar controles de los estándares de calibración, químicos y consumibles necesarios.



Calibración

La calibración es el procedimiento más importante dentro del procedimiento de medición, y consiste en establecer la relación entre los resultados que arroja el sistema de muestreo y un patrón de concentración conocida. Para cada uno de los equipos involucrados en el sistema de medición, se debe implementar un plan de calibración y controlarlo mediante cartas de calibración.

Acciones correctivas

Dentro de las acciones correctivas que se realizan en los sistemas de medición de contaminación del aire, se encuentran las acciones correctivas en el sitio, las cuales tienen como objetivo corregir los datos no satisfactorios o realizar la reparación del equipo. Asimismo, existen las acciones correctivas a largo plazo, cuya finalidad es eliminar las inconformidades en los datos. En términos generales, para llevar a cabo estas acciones correctivas, se siguen los siguientes pasos: definición del problema a resolver, asignación de la responsabilidad para investigar el problema, determinación de la acción correctiva para eliminar el problema, asignación de la responsabilidad para implementar la acción correctiva, establecimiento de la efectividad de la acción correctiva y verificación de la eliminación del problema.

Costos de calidad

La identificación de los costos totales del control y aseguramiento de calidad es muy importante para tratar de minimizarlos al máximo. Por lo tanto, esta identificación de costos debe ser periódica para cumplir con este objetivo. Dentro de los sistemas de medición de la contaminación del aire, se pueden identificar los costos de prevención, los costos de valoración (relacionados con el muestreo y el análisis de datos) y los costos de corrección de fallas.



Pruebas inter laboratorios y dentro del laboratorio

Las pruebas inter-laboratorios se llevan a cabo entre laboratorios que realizan mediciones similares, utilizando los mismos métodos y técnicas de medición. Estas pruebas permiten evaluar el grado de concordancia entre los resultados obtenidos por los diferentes laboratorios y detectar posibles fuentes de error y variabilidad en los métodos y técnicas de medición utilizados.

Por otro lado, las pruebas dentro del laboratorio se realizan para evaluar la capacidad del laboratorio para producir resultados válidos y fiables de manera consistente. Estas pruebas incluyen la realización de mediciones repetidas en diferentes condiciones, la comparación de resultados entre diferentes analistas y la evaluación de la estabilidad y precisión de los equipos y materiales utilizados.

En el caso de los laboratorios de monitoreo de emisiones atmosféricas, estas pruebas son especialmente importantes debido a la complejidad de las mediciones y la necesidad de asegurar la exactitud y precisión de los resultados. Las pruebas inter-laboratorios permiten comparar los resultados obtenidos por diferentes laboratorios y garantizar la fiabilidad de los datos, mientras que las pruebas dentro del laboratorio permiten identificar posibles fuentes de error y variabilidad en los métodos y técnicas de medición utilizados. En última instancia, estas pruebas permiten mejorar la calidad de los resultados y la confianza en la información proporcionada por los laboratorios de monitoreo de emisiones atmosféricas.

Procedimiento de auditoría

Una auditoría se lleva a cabo en una porción o en la totalidad del sistema y tiene como objetivo evaluar cuantitativamente la calidad de los datos obtenidos en el sistema de medición en su totalidad, es decir, en la recolección de la muestra, el análisis de la muestra y el procesamiento de los datos.



Validación de datos

En esta etapa, los datos deben ser filtrados, aceptados o rechazados de acuerdo con ciertos criterios amplios para proceder a realizar análisis posteriores de los mismos. En el caso de que se rechacen o invaliden los datos, éstos deben conservarse para su posterior análisis. Esta etapa dependerá del tipo de datos y los objetivos de las mediciones. Algunos métodos que nos permiten validar los datos son el test de límites, el test del total de datos, el test de relaciones entre parámetros y el test de comparación entre sitios.

Análisis estadístico de los datos

Los requerimientos del usuario y el tipo de datos obtenidos son los dos factores que determinan la técnica apropiada para el análisis estadístico de los datos.

5.5. Índices de calidad del aire

Los índices de calidad del aire hacen referencia a la calidad del aire medida de forma diaria. Estos utilizan los resultados de las concentraciones de diferentes contaminantes obtenidos mediante equipos de monitoreo, y permiten comparar la calidad del aire entre diferentes localidades. Su objetivo se centra en los efectos sobre la salud humana que pueden producirse al estar expuesto a esos contaminantes (Grijalbo Fernández, 2016).



CAPÍTULO 6

Modelación de la dispersión de
contaminantes atmosféricos

CAPÍTULO 6

MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

6

El capítulo se enfoca en la modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos, una herramienta esencial para entender y controlar los efectos de los contaminantes en el ambiente. El capítulo comienza describiendo los usos de la modelación en la evaluación de impacto ambiental y la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la calidad del aire. Se describen las diferentes escalas espaciales utilizadas en la modelación, como la microescala, meso escala y macro escala. También se describen los diferentes tipos de modelos utilizados en la modelación, como los modelos gaussianos, numéricos, estadísticos, de caja, físicos, Eulerianos, Langrange, de receptor y semiempíricos. En la sección de ventajas del modelamiento, se discuten las ventajas de utilizar la modelación en la evaluación de impacto ambiental y la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la calidad del aire. La metodología de modelación se describe a continuación, incluyendo el modelo screening, los modelos refinados y la precisión de la modelación. En la sección de normativa aplicada a los modelos de dispersión, se menciona el sistema de modelado AERMOD.

6.1. Usos de la modelación

Las técnicas de modelación de la dispersión de contaminantes son una herramienta utilizada para estimar la mezcla y dilución de contaminantes en la atmósfera mediante aproximaciones matemáticas que representan el fenómeno. Esta técnica de modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos se remonta a la Primera Guerra Mundial, donde se utilizó en relación con el uso de gases tóxicos como armas. Los modelos pueden simular situaciones simples, como una única fuente



puntual con un único receptor y condiciones constantes, hasta situaciones complejas con varias fuentes, varios receptores y cambios en las condiciones atmosféricas y otras condiciones específicas. Estos modelos se utilizan para reducir el riesgo de elección equivocada de sistemas de control antes de su implementación, permitiendo simular diferentes escenarios con diferentes condiciones y datos compuestos por miles y a veces millones de registros.

La simulación matemática de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos es compleja debido a la cantidad de variables que intervienen, lo que la convierte en una técnica inexacta. Por lo tanto, esta técnica se utiliza para planificación y adopción de normas para corregir situaciones donde se superan los niveles aceptables de impacto atmosférico.

Los modelos de dispersión actuales están especializados para fuentes fijas y móviles, fuentes con emisiones continuas y no continuas, entre otros. Las ecuaciones utilizadas en los modelos de dispersión se han convertido en programas de computadora sofisticados que facilitan el trabajo al permitir simular diferentes condiciones y datos compuestos por miles o millones de registros.

Los principales usos de los modelos de dispersión son: la determinación de las áreas de influencia de las fuentes contaminantes, la planificación urbana e industrial a nivel regional, local y nacional, la evaluación de los niveles de contaminación del aire en áreas urbanas o rurales, la implementación de programas regulatorios locales en materia de contaminación atmosférica, el análisis de los efectos de descargas accidentales de gases tóxicos, el diseño de redes de monitoreo de la calidad del aire, el diseño de programas de prevención de la contaminación atmosférica, la comparación de alternativas de sistemas de control y la determinación de la altura óptima de chimeneas en instalaciones industriales.



6.2. Sistema de transportación sostenible

El transporte sostenible es un tema crítico en la actualidad. El modelado de emisiones es una herramienta valiosa para comprender la cantidad de contaminantes que se emiten en el sector del transporte y las actividades relacionadas. Sin embargo, es importante también entender el destino de estas emisiones y cómo afectan a la calidad del aire. Es aquí donde entran los modelos de dispersión atmosférica. Estos modelos nos permiten estimar las concentraciones de contaminantes en un punto específico debido a ciertas emisiones, lo que nos ayuda a evaluar la exposición y determinar si las concentraciones superan los límites establecidos. La modelización es una herramienta valiosa para obtener esta información, ya que es difícil monitorear en todos los rincones debido a la escasez de recursos y personal.

6.3. Dispersión atmosférica

La dispersión atmosférica es un concepto fundamental para comprender el impacto de las emisiones en el ambiente. Existen una gran variedad de fuentes de emisiones, que incluyen aviones, vehículos, calles, el uso de energía en hogares, barcos e incluso fuentes naturales como volcanes e incendios forestales. Estas emisiones pueden provenir de sectores industriales, transporte, centrales eléctricas y otras fuentes.

Cuando estas emisiones entran en la atmósfera, están sujetas a la dispersión, que es el proceso mediante el cual los contaminantes se distribuyen en el aire. Esta dispersión puede conducir a un aumento en la concentración de contaminantes en la atmósfera, lo cual puede tener impactos negativos en la salud humana, los animales, los edificios, la vegetación y otros receptores. Por ejemplo, pueden ocurrir problemas respiratorios en humanos, los edificios pueden ensuciarse y los cultivos pueden dañarse.



Para comprender y estimar estos impactos, es esencial conocer la concentración de contaminantes en la atmósfera. Es aquí donde entran en juego los modelos de dispersión. Estos modelos utilizan ecuaciones matemáticas y datos sobre las condiciones climáticas y las emisiones para estimar la concentración de contaminantes en una ubicación específica. Al utilizar estos modelos, podemos comprender mejor los impactos potenciales de las emisiones en el ambiente y tomar medidas para mitigarlos. Es importante señalar que, a través de estos modelos de dispersión, se pueden tomar decisiones informadas y medidas preventivas para proteger la salud humana y el ambiente.

6.4. Componentes básicos del modelado de calidad del aire

El modelado de calidad del aire implica varios componentes clave para formar un modelo completo. Estos incluyen:

- *Datos de emisiones:* información sobre la cantidad de contaminación que proviene de una fuente específica.
- *Parámetros de la fuente:* características de la fuente como la altura de la chimenea, el diámetro y la ubicación (a nivel del suelo o a cierta altura).
- *Ubicación del receptor:* el punto de interés donde se calcula la concentración, como un área industrial o un pueblo.
- *Meteorología:* parámetros como la velocidad del viento, la dirección, la temperatura y la humedad.
- *Clasificación de estabilidad:* la estabilidad de la atmósfera, como inestable, estable o inversión.
- *Concentraciones iniciales:* la concentración de fondo en la ubicación del receptor, que es importante para comparar con los estándares nacionales de calidad del aire ambiental.



- *Química del aire:* las reacciones químicas en la atmósfera, que pueden tener un papel significativo en la estimación de ciertos contaminantes como el ozono y los aerosoles secundarios.
- *Procesos de eliminación:* las formas en que los contaminantes son eliminados de la atmósfera, como la deposición seca.

Todos estos componentes son esenciales para comprender el impacto de la contaminación en la calidad del aire y determinar los pasos necesarios para reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire.

6.5. Escala espacial de modelación

El uso de un modelo específico está determinado por la escala a la que se desea modelar, lo que implica considerar las escalas de los procesos atmosféricos.

6.5.1. Microescala

A esta escala, que se caracteriza por longitudes menores a 1 km, el flujo es muy complejo. La morfología del terreno y la orientación respecto al viento son algunos de los factores que intervienen en este flujo, además de los efectos termales e hidrodinámicos. Muchos de los modelos desarrollados para estudiar este tipo de flujo se crean con fines específicos (Steyn, 2016).

Los modelos de calidad del aire de escala local se han utilizado con fines regulatorios, en su mayoría basados en modelos Gaussianos. La utilización de este tipo de modelos ha aumentado en respuesta al conocimiento y parametrización de la estructura de la capa límite. Los datos de entrada para estos modelos incluyen principalmente parámetros locales y la configuración morfológica del terreno.



6.5.2. Meso escala

En esta escala, las longitudes características se encuentran entre 1 y 1000 km. Los factores que afectan en esta escala son los efectos hidrodinámicos, como la canalización del flujo y la rugosidad, así como la falta de homogeneidad en el balance de energía, que puede deberse a variaciones en el uso del suelo, la morfología del terreno, la distribución del agua, la orientación del terreno y la pendiente.

En las escalas locales a regionales, los fenómenos de dispersión son afectados por procesos atmosféricos, como en el caso de estudios en el total de un área urbana, en los que se requiere la utilización de herramientas de modelamiento complejas.

En la escala local a regional, los modelos de calidad de aire se utilizan principalmente para el estudio de fenómenos en el total de un área urbana. Para ello, se emplean herramientas de modelación complejas que tienen en cuenta los procesos de transporte, deposición y transformación química de los contaminantes.

En la escala regional a continental, los modelos de calidad del aire se utilizan para cuantificar los niveles de SO_x , NO_x , NH_y y foto oxidantes, especialmente el ozono (O_3), así como para estudiar la deposición de compuestos acidificados en el ecosistema. Además, se utilizan para comprender los procesos químicos y físicos que se encuentran detrás de la formación, el transporte y la deposición de estos compuestos. Este tipo de modelos se desarrollaron a partir de la constatación de que la contaminación atmosférica ya no era solo un problema local.

6.5.3. Macro escala

En la macro escala, las longitudes características exceden los 1000 km. En esta escala se encuentran la mayoría de los fenómenos atmosféricos globales y regionales a continentales. La distribución geográfica de los sistemas de presión está



directamente asociada con esta escala, debido principalmente a la falta de homogeneidad en el balance de energía superficial a gran escala. Los procesos atmosféricos de esta escala se abordan con mucha aceptación utilizando aproximaciones hidrostáticas.

Los modelos de calidad del aire a escala global se utilizan para estudiar los cambios en la composición de la atmósfera global. Estos modelos se centran en metano, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, CFCs, compuestos sulfurados y otros contaminantes. Además, estos modelos también examinan la combinación de estos contaminantes con el ozono, hidróxidos y peróxidos de hidrógeno, con el fin de medir los cambios en la tropósfera que pueden tener efectos sobre la salud humana, la producción biológica y la contribución al cambio climático.

Los modelos a escala global o modelos de transporte químico tienen como principal objetivo describir y predecir la evolución de la composición química de la atmósfera y su impacto en el cambio climático. En general, este tipo de modelos se utilizan para estudiar los cambios que se producen en la tropósfera y su interacción con la estratósfera.

6.6. Tipos de modelos

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos agrupa los modelos de calidad de aire en:

Modelos fotoquímicos

Por ejemplo, CMAQ y CAMx, estos modelos se utilizan para evaluar la formación de contaminantes atmosféricos secundarios, como el ozono, a partir de reacciones químicas en la atmósfera. Los modelos fotoquímicos también se utilizan para evaluar la efectividad de las estrategias de control de la contaminación y para



desarrollar planes de cumplimiento de las normas de calidad del aire (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Modelos de dispersión

Por ejemplo, AERMOD y CALPUFF, estos modelos se utilizan para evaluar cómo se dispersan los contaminantes atmosféricos en la atmósfera y cómo se transportan a través de esta. Estos modelos son útiles para predecir las concentraciones de contaminantes en áreas específicas, lo que puede ayudar a tomar decisiones informadas sobre la gestión de la calidad del aire (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Modelos de emisiones

Por ejemplo, TANKs, estos modelos se utilizan para estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos de diversas fuentes, incluyendo el transporte, la industria y las actividades domésticas. Estos modelos son útiles para identificar las fuentes de contaminación y desarrollar estrategias de control de la contaminación (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Modelos de deposición

Por ejemplo, ISCST3 y CALPUFF, estos modelos se utilizan para evaluar cómo los contaminantes atmosféricos se depositan en la superficie de la tierra y el agua, y cómo afectan la calidad del aire, el agua y los suelos. Estos modelos también se utilizan para evaluar el impacto de las emisiones de contaminantes atmosféricos en los ecosistemas y la salud humana (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



6.6.1. Gaussianos

El modelo de distribución Gaussiana o distribución normal estadística es uno de los modelos más utilizados para el estudio de contaminantes no reactivos. Ofrece una excelente aproximación matemática para la dispersión de estos contaminantes. Este modelo se basa en la idea de que el material proveniente de la fuente es transportado en dirección del vector de velocidad del viento, por lo que las concentraciones más altas se encuentran en el centro de la pluma y las más bajas en los extremos (Wark & Warner, 1990).

En resumen, el modelo de distribución Gaussiana o normal supone que la concentración de la pluma, en cada distancia en dirección del viento, tiene una distribución Gaussiana o normal independientemente de la dirección horizontal y vertical. La mayoría de los modelos recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos son de este tipo.

Estos modelos se utilizan con fines regulatorios, para apoyar políticas y para investigación científica en la escala local a regional.

6.6.2. Numéricos

Los modelos numéricos se utilizan cuando se desean analizar la formación de contaminantes secundarios a partir de reacciones químicas. Estos modelos tienen mayor precisión que los modelos Gaussianos al analizar fuentes contaminantes en zonas urbanas que involucren contaminantes reactivos, aunque requieren una gran cantidad de datos complejos, lo que limita su uso generalizado. Uno de los usos más comunes de estos modelos es en la predicción de la formación de ozono, así como en el estudio de la conversión de dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en sulfatos y nitratos, contribuyendo así a la lluvia ácida (Steyn, 2016).



6.6.3. Estadísticos

Los modelos estadísticos o empíricos son utilizados con frecuencia en procesos químicos y físicos que no tienen una clara interpretación científica o cuando se dispone de una base de datos fiable y completa. Estos modelos se basan en técnicas estadísticas o semi empíricas para analizar tendencias, relaciones entre la calidad del aire y las mediciones atmosféricas y para predecir la evolución de situaciones de contaminación a corto plazo, utilizando análisis de distribución de frecuencias, análisis de series de tiempo y otros métodos estadísticos (Steyn, 2016).

Los modelos estadísticos tienen limitaciones al no tener relaciones causa-efecto, pero son utilizados para realizar predicciones de corto plazo en tiempo real en situaciones en las que se dispone de información de concentraciones y sus respectivas tendencias. Estos modelos son utilizados a nivel local y regional como soporte a políticas e investigación científica.

6.6.4. De caja

El modelo de caja de aire finita se basa en la idea de que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas. Para utilizar este modelo, se deben definir varios parámetros como las dimensiones con viento a favor, viento de costado y las dimensiones verticales de la caja, así como el periodo de tiempo de emisión de contaminantes. Este tipo de modelos supone también que las emisiones se mezclan totalmente con el aire disponible para la dilución de forma inmediata, y que los contaminantes son químicamente estables y permanecen en el aire. Estos modelos se utilizan comúnmente para evaluar la calidad del aire en aeropuertos (Steyn, 2016).



6.6.5. Físicos

La utilización de este tipo de modelos requiere de un alto nivel de conocimientos técnicos especializados y acceso a los recursos necesarios. Son útiles para simular situaciones de flujo complejo, con terrenos muy irregulares, donde se presenta apantallamiento por edificaciones o sobre alturas del terreno sobresalientes, el análisis del impacto de la pluma sobre el terreno, edificaciones y otras estructuras, y la difusión en un entorno urbano. Estos modelos se pueden aplicar a un grupo de fuentes agrupadas en unos pocos kilómetros cuadrados. Para ejecutar este tipo de modelos se requiere el uso de túneles de viento, canales de agua u otros medios para modelar fluidos.

Aunque este tipo de modelo es la mejor y más precisa aproximación a la realidad entre todas las técnicas mencionadas, es muy poco utilizado debido a los recursos necesarios que se deben tener para poder utilizarlo.

6.6.6. Modelos Eulerianos

Los modelos Eulerianos son un tipo de modelo que utiliza ecuaciones Eulerianas, que se basan en la conservación de la masa del contaminante. Estos modelos se incluyen en los modelos de pronóstico meteorológico, y también hay versiones refinadas que incluyen submodelos para simular turbulencias. En los modelos Eulerianos, la dispersión de contaminantes se describe usando las ecuaciones básicas de la hidrodinámica, teniendo en cuenta el balance del momentum, el balance de calor, el balance de humedad, las leyes de los gases, el balance de masa del aire por debajo de la altura de mezcla y el balance de los contaminantes estudiados. Sin embargo, estos modelos no suelen tener un buen desempeño en situaciones convectivas. Se utilizan con fines regulatorios, como soporte para políticas y en investigación científica a nivel local, regional, continental y global.



6.6.7. Modelos de Lagrange

Este tipo de modelos está en función del tipo de plumas, ya sean segmentadas o rotas, así como de emisiones puff o partículas, es decir, cuando se trata de emisiones instantáneas no continuas. Los modelos de Lagrange utilizan un número de partículas ficticias para simular la dinámica de un parámetro físico determinado. Estas partículas poseen características como no tener volumen, no considerar flotación y tener una masa tal que la suma de todas las partículas emitidas en una unidad de tiempo sea igual a la tasa de emisión de la fuente. Los modelos basados en Lagrange se ajustan a la realidad en condiciones convectivas y son utilizados como soporte a políticas e investigación científica a nivel local, regional y continental (Wark & Warner, 1990).

6.6.8. Modelos de receptor

Los modelos de receptor se basan en las concentraciones observadas en un receptor para repartir proporcionalmente las concentraciones observadas en un punto de muestreo entre varios tipos de fuente, para lo cual utilizan los balances de masa. Estos modelos son utilizados como soporte a políticas e investigación científica a nivel local y regional (Wark & Warner, 1990).

6.6.9. Modelos semiempíricos

Los modelos semiempíricos son diseñados para aplicaciones prácticas específicas y se caracterizan por drásticas simplificaciones y un alto grado de parametrización empírica. Son utilizados con fines regulatorios, como soporte a políticas, para brindar información pública y en investigación científica a escala local a regional (Werner & Mainwaring, 2011).



6.7. Ventajas del modelamiento

En el diseño de un modelo de dispersión, se deben tomar en cuenta las siguientes ventajas en comparación con las mediciones directas: el costo de preparación y análisis de datos es menor, se puede aumentar el número de receptores sin afectar los costos, se necesita menos tiempo para obtener resultados significativos, se pueden predecir cambios en las condiciones de operación de las fuentes contaminantes y se pueden identificar los puntos con mayores concentraciones de contaminantes. Sin embargo, los modelos no reemplazan la precisión de los resultados obtenidos mediante equipos de monitoreo.

6.8. Metodología de modelación

Esta sección del libro introduce al lector a los conceptos clave y las prácticas en el campo de la modelación atmosférica, abordando temas como los modelos screening, modelos refinados, precisión de la modelación y el sistema de modelado AERMOD. Esta sección proporciona una visión integral de las diferentes técnicas de modelado empleadas para evaluar y predecir la dispersión de contaminantes en la atmósfera. A lo largo del texto, se discuten tanto los modelos preliminares, como herramientas rápidas de evaluación, como los modelos refinados, que ofrecen análisis más detallados y precisos. Se hace hincapié en la importancia de la precisión en la modelación para garantizar resultados confiables y se presenta el sistema AERMOD, una herramienta ampliamente utilizada en la modelación de la calidad del aire que combina algoritmos avanzados con una interfaz accesible para abordar una amplia variedad de aplicaciones prácticas en el ámbito medioambiental.

6.8.1. Modelo Screening

La utilización del modelo de screening se da cuando solo existen una o dos fuentes y no se requiere un análisis más aproximado. La característica de este tipo de



modelo es la capacidad de extrapolar las condiciones meteorológicas más desfavorables para situaciones determinadas mediante sus algoritmos internos, generalmente teniendo en cuenta la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica. Aunque esta metodología no necesita necesariamente el ingreso de datos meteorológicos, estos modelos son llamados también como de peor caso y pueden ser utilizados tanto para terreno plano como para terreno irregular.

6.8.2. Modelos refinados

En el sector de modelación, los modelos refinados son utilizados principalmente con fines regulatorios y requieren datos específicos para su correcta ejecución, incluyendo meteorología detallada, características topográficas, ubicación de fuentes y receptores, factores de emisión y concentración de fondo. La información mínima necesaria para ejecutar un modelo refinado incluye un plano digitalizado con la localización de estructuras y puntos de emisión, zonas habitadas y estructuras civiles cercanas, carreteras, ferrocarriles, caminos, puentes y curvas de nivel, así como las coordenadas de las fuentes contaminantes. Estos modelos se aplican con fines regulatorios, soporte a políticas e investigación científica a nivel local, regional, continental y global.

En cuanto a las dimensiones de las estructuras, se debe tener en cuenta que aquellas que superen el 40% de la altura de la fuente más baja deben ser consideradas. En el caso de la existencia de teas, es necesario contar con información sobre la tasa de flujo del gas combustible y del gas desechado evaporado, así como su respectiva presión y temperatura. Además, se requieren datos sobre la fracción molar de los componentes en el gas evaporado y en el gas desechado evaporado.

Es importante tener en cuenta que los datos de entrada pueden variar dependiendo del modelo en cuestión. Por ejemplo, los modelos fotoquímicos



requieren información diferente a otros tipos de modelos, y también pueden variar un poco en el caso de modelos de emisiones instantáneas.

6.8.3. Precisión de la modelación

La precisión de la modelación depende de factores como el modelo matemático y la calidad de los datos de entrada. Dentro de un modelo de dispersión existen variables conocidas que son factibles de ser medidas, como la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la altura de mezcla, los factores de emisión, las características de los receptores y las fuentes, entre otros. También existen otras variables que son factibles de ser medidas, como algunos detalles no resueltos del flujo atmosférico como el campo de velocidad turbulenta, pero que reducen la precisión de los resultados finales obtenidos de los contaminantes al ejecutar el modelo. Estos errores son llamados incertidumbre inherente y, según los estudios realizados, solo se les puede atribuir un rango típico de variación de $\pm 50\%$.

Cuando no se dispone de datos de calidad aceptable, se presentan errores como imprecisiones en la entrada de datos conocidos, como factores de emisión y meteorología, errores en las concentraciones medidas que se utilizan para calcular concentraciones residuales y modelos físicos incorrectos e inadecuadamente formulados. Estos errores disminuyen directamente con el uso de una base de datos de mejor calidad. La exactitud del modelo se mide mediante los parámetros de las bases de datos y la física utilizada, así como la formulación del modelo. La medición de la exactitud del modelo debe realizarse mediante comparaciones estadísticas entre los datos obtenidos del modelo utilizado y los resultados obtenidos de mediciones realizadas con equipos técnicamente calibrados y con un procedimiento de muestreo certificado.

La literatura especializada confirma, con base en a estudios realizados en varios países, que los modelos son más confiables para medir concentraciones



promedio a largo plazo que para estimar concentraciones a corto plazo en un sitio específico. También son bastante confiables para estimar picos de concentraciones en un área determinada, aunque el error típico en este caso es del 10% al 40%. Según artículos publicados por la EEA (Agencia Europea del Medio Ambiente), para modelos fotoquímicos urbanos los errores medidos son de al menos el 10%. La precisión de un modelo es mayor cuando su modelo matemático se ajusta mejor a la física y química de la atmósfera. Los resultados serán más precisos y cercanos a la realidad si se cuenta con datos de entrada de alta calidad.

6.8.4. Sistema de modelado AERMOD

Uno de los modelos utilizados para el cumplimiento normativo, correspondía al modelo ISC3, más, la Sociedad Meteorológica Americana y la Agencia de Protección Ambiental han implementado el sistema AERMOD para mejorar los modelos de calidad del aire y utilizar conceptos de modelado avanzados. Este modelo considera la dispersión del aire en función de la estructura y tamaño de la capa límite planetaria de la turbulencia y puede manejar fuentes de aire tanto superficiales como elevadas, así como terrenos simples y complejos. Desde diciembre de 2006, AERMOD ha reemplazado completamente al modelo ISC3 (Complejo de Fuentes Industriales) de acuerdo con el Apéndice W del 40 CFR Part 51.

El sistema de modelado AERMOD cuenta con dos procesadores de datos de entrada que son esenciales para su funcionamiento: AERMET, que procesa datos meteorológicos y tiene en cuenta la dispersión del aire basada en la estructura y conceptos de escalado de la capa límite planetaria de la turbulencia, y AERMAP, que procesa datos de terreno y utiliza los datos de elevación digital de USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para manejar terrenos complejos. Otros componentes del sistema que no son reguladores incluyen: AERSCREEN, una versión de pantalla de AERMOD; AERSURFACE, un procesador de características de superficie; y BPIP PRIM, un programa de dimensiones de edificios múltiples que



utiliza los procedimientos técnicos GEP para aplicaciones PRIME (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

Actualmente, AERMOD no es capaz de calcular los valores de diseño para el NAAQS (Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental) de plomo basados en promedios móviles de 3 meses. Sin embargo, hay una herramienta de post procesamiento llamada LEADPOST disponible para calcular estos valores a partir de la salida mensual de AERMOD. Esta herramienta muestra el promedio acumulativo móvil (todas las fuentes) de 3 meses en cada receptor modelado, incluyendo las contribuciones del grupo de fuentes, así como la máxima concentración acumulativa móvil (todas las fuentes) de 3 meses por receptor (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).



CAPÍTULO 7

Fuentes móviles

CAPÍTULO 7 FUENTES MÓVILES

7

En términos generales, una fuente móvil es una fuente de emisiones de gases que es capaz de desplazarse. Los vehículos automotores son un ejemplo típico de fuentes móviles, ya que emiten gases a través del escape mientras se desplazan. Estos gases están compuestos principalmente por hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, que se producen como resultado del funcionamiento del motor y de la composición del combustible utilizado. La evaluación de las emisiones de una fuente móvil se lleva a cabo mediante ciclos de prueba, que son períodos de tiempo específicos en los que se mide la emisión de gases. En el caso de las fuentes móviles que tienen un electroventilador, el ciclo de prueba se inicia cuando se activa el ventilador del sistema de enfriamiento y finaliza cuando se detiene.

Se puede decir que la contaminación atmosférica por fuentes móviles ha sido un tema de gran importancia en países como Estados Unidos, donde ya en 1943 se identificaron niveles elevados de contaminación en la ciudad de Los Ángeles. Para 1948, se aprobó una legislación para tratar de frenar las fuentes de emisión, y en 1963 se aprobaron leyes en California para el control de emisiones mediante un sistema de ventilación positiva en el cárter. En nuestro país, aunque no se ha estudiado y controlado completamente la contaminación atmosférica por fuentes móviles, su control se centra en las ciudades de Quito, Guayaquil y Cuenca. Una de las razones para la falta de control en este ámbito es el alto costo de la infraestructura técnica requerida (Wark & Warner, 1990).

En nuestro país, aún se encuentra en una etapa muy básica el control de la contaminación atmosférica causada por fuentes móviles. Además, en las ciudades donde existen requisitos para realizar verificaciones de contaminantes, los



propietarios de automóviles eluden estos controles mediante la matriculación de sus vehículos en cantones cercanos donde no se implementa esta legislación.

En el presente año 2022, países de Unión Europea, como Francia, Alemania e Inglaterra, se han puesto el objetivo de eliminar paulatinamente los motores que funcionan con el combustible (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2003) diésel hasta el año 2040 por la elevada contaminación atmosférica que producen los mismos.

7.1. Normas Internacionales

7.1.1. Normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO)

Las Normas ISO son un conjunto de estándares técnicos internacionales desarrollados por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Estas normas se utilizan para establecer las mejores prácticas y criterios para diversas actividades y procesos en distintos ámbitos, como la calidad, la seguridad, la gestión ambiental, la gestión de energía, la informática, entre otros. El objetivo de las Normas ISO es promover la eficiencia, la calidad y la competitividad en las empresas y organizaciones, facilitar el comercio internacional y fomentar la confianza entre las partes involucradas. Estas normas son voluntarias y se utilizan a nivel mundial, aunque en algunos países se hacen obligatorias por ley.

Las Normas ISO que están vigentes para el control y seguimiento de emisiones de fuentes móviles son:

- ISO 14064-1:2018 - Gestión de gases de efecto invernadero - Parte 1: especificación con guía para la medición, verificación y certificación de las emisiones de gases de efecto invernadero.



- ISO 14064-2:2019 - Gestión de gases de efecto invernadero - Parte 2: especificación con guía para la verificación y certificación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- ISO 14064-3:2019 - Gestión de gases de efecto invernadero - Parte 3: especificación con guía para la verificación y certificación de la información de emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero.
- La Norma ISO 8178 está dividida en varias partes, cada una de ellas especifica los requisitos para diferentes aspectos de los motores diésel:
 - ✓ Parte 1: motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios - Métodos de ensayo para medir las emisiones de gases.
 - ✓ Parte 2: motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios - Requisitos de emisiones de gases para la regulación de los motores diésel.
 - ✓ Parte 3: motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios - Requisitos de emisiones de gases para la regulación de los motores diésel en condiciones de carretera.
 - ✓ Parte 4: motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios - Requisitos de emisiones de gases para la regulación de los motores diésel en condiciones de laboratorio.
 - ✓ Parte 5: motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios - Requisitos de emisiones de gases para la regulación de los motores diésel en condiciones de laboratorio para vehículos pesados y autobuses.



- ✓ Parte 6: motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios - Requisitos de emisiones de gases para la regulación de los motores diésel en condiciones de laboratorio para vehículos ligeros.

La Norma ISO 14064:2018, dividida en tres partes, establecen un marco para la medición, verificación y certificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto o actividad. Proporciona una guía para la identificación y cuantificación de las emisiones de GEI y para la verificación y certificación de los datos de emisiones. Esta norma es aplicable a todos los tipos de emisores de GEI y a todos los tipos de actividades, incluyendo la industria, la energía, el transporte, la agricultura, la deforestación y la degradación de los suelos. Está diseñada para ser utilizada por organizaciones públicas y privadas, así como por gobiernos y otras partes interesadas (International Organization for Standardization, 2019).

La Norma ISO 14064-1:2018 incluye tres partes principales: principios y requisitos generales, proceso de medición, verificación y certificación y requisitos de verificación y certificación. También incluye una guía para la implementación de la norma y una guía para el uso de la norma en proyectos de reducción de emisiones (International Organization for Standardization, 2018).

La Norma ISO 8178 establece los requisitos y métodos de ensayo para medir las emisiones de gases de los motores diésel para vehículos rodantes y estacionarios. Esta norma se utiliza para establecer los límites máximos de emisiones permitidos para los motores diésel en diferentes condiciones de uso y para evaluar el cumplimiento de estos límites (International Organization for Standardization, 2019).

La Norma ISO 8178 se aplica a todos los tipos de motores diésel, incluyendo los motores diésel para vehículos ligeros, vehículos pesados, autobuses y motores



diésel estacionarios. Esta norma se utiliza como una guía para la regulación y control de las emisiones de gases de los motores diésel y para promover la reducción de la contaminación del aire y la protección del ambiente (International Organization for Standardization, 2020).

7.2. Normas técnicas ecuatorianas

En nuestro país las normas que rigen los procedimientos para el control de las emisiones atmosféricas generadas por fuentes móviles son:

- NTE INEN 2 349. Revisión técnica vehicular. Procedimientos.
- NTE INEN 2 202. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de Diesel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre.
- NTE INEN 2 203. Medición de Emisiones de Gases De Escape en Motores de Combustión Interna.
- NTE INEN 2 204. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina.
- NTE INEN 2 207. Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que utilizan Diésel.

Todas estas normas han sido promulgadas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización. Cabe señalar que estas normas son de carácter voluntario, por lo que en muchas ciudades no se han implementado en su totalidad. Dentro de estas normas se presentan los procedimientos para la ejecución obligatoria de la revisión técnica



vehicular (RTV), que incluyen la descripción de procedimientos y equipamiento. La norma NTE INEN 2 656 referente a la Clasificación vehicular define el tipo y tamaño de vehículo, lo que se utilizará para seleccionar la norma a ser utilizada, el método de análisis adecuado y sus límites permisibles.

La norma, además de presentar los procedimientos y equipos para determinar la idoneidad de los automóviles sometidos a revisión, describe los procedimientos y equipos utilizados para el análisis de las emisiones emitidas a la atmósfera, que es de interés en esta obra. Todos los equipos deben ser instalados y conectados de manera que la revisión vehicular se realice de forma secuencial y continua.

7.3. Prueba de emisiones en la revisión técnica vehicular (RTV) de acuerdo con normativa ecuatoriana.

La norma NTE INEN 2 349 divide en dos métodos de ensayo la realización de la prueba de emisiones, según el tipo de motor que propulse el vehículo. El primer caso es para motores ciclo Otto de 4 tiempos, y el método de ensayo debe cumplir con lo descrito en la norma técnica NTE INEN 2 203 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013). El segundo caso es para motores de ciclo Diesel, y el método de ensayo se debe ajustar a lo descrito en la norma NTE INEN 2 202 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2000).

La norma NTE INEN 2 349, dentro de los equipos necesarios para el ensayo de emisiones atmosféricas, requiere un analizador de cuatro gases que pueda actualizarse a 5 gases mediante la habilitación del canal de óxidos de nitrógeno (NO_x) para emisiones provenientes de motores ciclo Otto de cuatro tiempos (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2003). Esto se detalla en la Tabla 7-1.



Tabla 7-1.

Rangos de medición que debe cumplir un analizador de gases según NTE INEN 2 349 para motores ciclo Otto de 4 tiempos.

Variables	Rango de medición
Monóxido de carbono (CO)	0 – 10%
Dióxido de carbono (CO ₂)	0 – 16%
Oxígeno (O ₂)	0 – 21%
Hidrocarburos no combustionados	0 – 5 000 ppm
Velocidad de giro del motor	0 – 10 000 rpm
Temperatura de aceite	0 – 150 °C
Factor lambda	0 – 2

Nota. Adaptado de Norma Técnica del Instituto Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 2 349:2003. Revisión técnica vehicular. Procedimientos.

El equipo debe presentar la concentración de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC) y oxígeno (O₂) en volumen, su medición y reporte deberá ser de forma automática, y las muestras son de los gases emitidos por el escape de los automotores de ciclo Otto de 4 tiempos, que usen de combustible la gasolina, gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural comprimido (GNC) (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2003).

La medición de gases para motores de ciclo Otto, debe ser acompañada por las revoluciones por minuto (rpm) del motor, factor lambda que es calculado mediante la fórmula Bret Schneider y temperatura del aceite.

En motores con ciclo Diésel se mide la opacidad de humo mediante un equipo que mida y presente los resultados de forma automática, el cual se llama opacímetro que deberá cumplir con norma técnica ISO 11614:1999. La medición de opacidad de ser acompañada de los resultados de la velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto (rpm) y la temperatura de aceite. Estas especificaciones serán para cualquier configuración del motor, así como, para todo tipo de sistema de alimentación de combustible y diámetro de cañería (International Organization for Standardization, 1999).



Los motores que utilizan gasolina no podrán emitir al aire emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) bajo condiciones de temperatura normal de operación y en marcha mínima o ralentí (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017), en concentraciones mayores a la Tabla 7-2.

Tabla 7-2.

Límites máximos permisibles en fuentes móviles con motor a gasolina en marcha mínima o ralentí en prueba estática.

Año modelo	% CO ^a		ppm HC ^a	
	0 -1500 ^b	1500 – 3000 ^b	0 – 1500 ^b	1500 – 3000 ^b
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

a Volumen
b Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm)

Nota. Adaptado de NTE INEN 2204. Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina.

Los motores con ciclos americanos FTP-75, que utilicen como combustible a la gasolina, no podrán excederse en la emisión al aire de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos totales (THC) e hidrocarburos diferentes al metano (NMHC) (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017), en las concentraciones que se presentan en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3.

Límites máximos permisibles de emisiones de fuentes móviles para motor de gasolina en prueba dinámica (ciclos americanos FTP-75, g/mi)

Categoría	50 000 millas/5 años				100 000 millas/10 años ^a			
	CO g/mi	THC g/mi	NMHC g/mi	NO _x g/mi	CO g/mi	THC g/mi	NMHC g/mi	NO _x g/mi
Vehículos de pasajeros	3,4	0,41	0,25	0,4	4,2	-	0,31	0,60
LLDT, LVW < 3750 lbs	3,4	-	0,25	0,4	4,2	0,80	0,31	0,60
LLDT, LVW > 3750 lbs	4,4	-	0,32	0,7	5,5	0,80	0,40	0,97
HLDT, ALVW < 5750 lbs	4,4	0,32	-	0,7	6,4	0,80	0,46	0,98
HLDT, ALVW > 5750 lbs	5,0	0,39	-	1,1	7,3	0,80	0,56	1,53

^a Vida útil 120,000 millas/11 años para todos los estándares HLDT, THC y LDT.

Abreviaturas:

PBV Peso bruto vehicular

LVW Peso del vehículo cargado (tara + 300 lb)

ALVW LVW ajustado (promedio numérico de la tara y el PBV)

LDT Camión ligero

LLDT Camión liviano ligero (debajo de 6000 lb PBV)

HLDT Camión ligero pesado (sobre 6000 lb PBV)

Nota. Adaptado de NTE INEN 2204. Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina.

Las concentraciones de las emisiones al aire de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y emisiones evaporativas, de todas las fuentes móviles que posean motor a gasolina no podrán exceder los valores presentados en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4.

Límites máximos permisibles de emisiones para fuentes móviles para motor de gasolinas en pruebas dinámica (Directiva de la UE 98/69/CE)

Categoría	Clase	Peso de referencia (PR) kg	CO g/km	HC g/km	HC + NO _x g/km	NO _x	Ciclo de prueba
M ^a	-	Todas	2,3	0,2	-	0,15	ECE + EUDC (también conocido como MVEG-A)
	I	PR ≤ 1 305	2,3	0,2	-	0,15	
N1 ^b	II	1 350 < PR ≤ 1 760	4,17	0,25	-	0,18	
	III	1 760 < PR	5,22	0,29	-	0,21	

^a Salvo los vehículos cuyo peso máximo sobrepase 2500 kg.
^b Y los vehículos de la categoría M que sobrepasen 2500 Kg.
ECE + EUDC clasificación de acuerdo con la Unión Europea

Nota. Adaptado de NTE INEN 2204. Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina.

7.4. ¿Cómo se originan las emisiones del escape de motores?

Las emisiones que son liberadas a la atmosfera por parte de los motores son producto de la combustión de un combustible, proceso químico que necesita de oxígeno, el mismo que se encuentra presente en el aire. De esta forma, se puede mencionar que el monóxido de carbono se produce por la combustión incompleta del combustible, mientras que en una combustión completa se obtiene el dióxido de carbono. Otros subproductos de la combustión incompleta del combustible son los hidrocarburos no quemados. Estos tipos de contaminantes son controlados mediante una correcta mezcla de oxígeno-combustible. El problema radica en encontrar la mezcla que mejore la combustión completa sin afectar la formación de los otros contaminantes y el desempeño del motor.



Los óxidos de nitrógeno se forman principalmente a partir de reacciones entre el nitrógeno atmosférico del aire con el oxígeno. La formación de este tipo de óxidos sigue mecanismos complicados de reacción que dependen de la temperatura, presión, tiempo de reacción, y las concentraciones de nitrógeno y oxígeno. Es en este punto donde radica la dificultad del control de este tipo de contaminantes.

7.5. Equipos de control de emisiones vehiculares

En el ámbito del control de emisiones vehiculares existen tecnologías completamente comprobadas e implementadas, como los convertidores catalíticos, el sistema cerrado de ventilación positiva del cárter, el sistema de control de emisiones evaporativas y los sistemas de recirculación de gases de escape. Estos equipos son efectivos en la reducción de la contaminación del aire.

Las emisiones vehiculares son un problema que afecta a nuestro planeta, por lo que se han desarrollado tecnologías para controlarlas. Algunos ejemplos de estas tecnologías son los convertidores catalíticos, el sistema cerrado de ventilación positiva del cárter, el sistema de control de emisiones evaporativas y los sistemas de recirculación de gases de escape. Las fábricas de vehículos automotores también han implementado estos equipos para mejorar la eficiencia de los motores y disminuir las emisiones. Además, hoy en día se comercializan vehículos híbridos que reducen aún más la cantidad de emisiones atmosféricas.

7.5.1. Convertidor catalítico

El uso de convertidores catalíticos es una tecnología probada y ampliamente implementada en los vehículos para controlar las emisiones de gases contaminantes. Estos dispositivos se encargan de transformar químicamente los gases de escape en dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, utilizando una estructura base de cerámica recubierta con un catalizador metálico, usualmente platino, rodio o paladio.



Los diseños de estos dispositivos están optimizados para exponer la mayor superficie posible de catalizador a la corriente de gases de escape.

El convertidor catalítico es un dispositivo utilizado en los vehículos para transformar químicamente los gases de escape contaminantes a productos menos dañinos para la atmósfera. Está compuesto por una estructura base de cerámica recubierta de un catalizador metálico, usualmente platino, rodio o paladio, y consta de dos etapas, la primera es el uso de un catalizador de reducción, que permite la reducción de los óxidos de nitrógeno, y la segunda es el uso de un catalizador de oxidación, que permite la oxidación del monóxido de carbono. Estos dispositivos se encuentran en función de exponer la máxima área de superficie de catalizador a la corriente de gases de escape.

En relación con la contaminación atmosférica, es importante mencionar que el convertidor catalítico es un dispositivo utilizado en los vehículos automotores para transformar químicamente los gases de escape contaminantes producidos por el motor de combustión interna en dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de un catalizador de reducción y un catalizador de oxidación, que se encuentran en la estructura base de cerámica y están recubiertos con un catalizador metálico de platino, rodio o paladio. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos dispositivos no están diseñados para transformar químicamente los óxidos de azufre, por lo que es más factible eliminar este contaminante en el proceso químico de obtención del combustible.

7.5.2. Sistema cerrado de ventilación positiva del cárter

El sistema de control de emisiones evaporativas es diseñado para prevenir la liberación de gases del depósito de aceite del motor (cárter) a la atmósfera. Estos gases son conducidos a la cámara de combustión donde se queman junto con la mezcla de aire y combustible. Una de las piezas principales de este sistema es una



válvula de ventilación positiva. De esta manera, se evita que las emisiones de los vehículos afecten la calidad del aire.

7.5.3. Sistema de control de emisiones evaporativas

Las emisiones evaporativas son el resultado del escape de vapores de combustible desde el tanque o carburador. Estos vapores son llevados a la cámara de combustión y quemados junto con la mezcla de aire y combustible. Para controlar estas emisiones, se utilizan sistemas de control de emisiones evaporativas que impiden su liberación a la atmósfera.

7.5.4. Sistema de recirculación de gases de escape

Este sistema recircula pequeñas cantidades de gases de escape hacia el múltiple de admisión, reduciendo de esta forma las emisiones de óxidos de nitrógeno.

7.6. Combustibles opcionales como un mecanismo de control de emisiones

En algunos países, como Estados Unidos, se ha implementado una infraestructura para distribuir combustible mezclado con alcohol en todo el país con el objetivo de reducir las emisiones atmosféricas. La mezcla se realiza principalmente con gasolina y alcohol etílico o metílico, aunque en la actualidad se utiliza principalmente una mezcla del 10% de alcohol y el 90% de gasolina. Los estudios han demostrado que esta mezcla produce una reducción de hasta el 60% de monóxido de carbono, el 78% de hidrocarburos y el 55% de óxidos de nitrógeno en comparación con la utilización de gasolina como combustible. Sin embargo, el uso de alcohol en motores diésel es difícil, por lo que no se ha demostrado que tenga ventajas respecto al uso de combustible puro. Aun así, se han utilizado con cierto éxito emulsiones de combustible diésel con un 45% de alcohol (Wark & Warner, 1990).



CAPÍTULO 8

Control de emisiones

CAPÍTULO 8 CONTROL DE EMISIONES

8

El control de emisiones es esencial para garantizar un ambiente saludable y seguro. En el presente capítulo, se describen las diferentes técnicas y tecnologías utilizadas para controlar las emisiones en un sistema de procesamiento industrial. El capítulo está dividido en dos secciones: control de material particulado y control de emisiones de gases. La sección de control de material particulado cubre las técnicas utilizadas para reducir la cantidad de partículas emitidas al ambiente. Estas técnicas incluyen cámaras de asentamiento, separadores por inercia, ciclones, colectores húmedos, y separadores por colisionador. Además, se describen los diferentes tipos de filtros de tela o mangas y precipitadores electrostáticos utilizados para reducir las emisiones de partículas. La sección de control de emisiones de gases se centra en las técnicas utilizadas para reducir las emisiones de gases tóxicos. Estas técnicas incluyen absorción, adsorción, incineración, oxidación catalítica, biofiltración y condensación.

8.1. Ventilación

La ventilación no se considera un mecanismo de control de emisiones en sí mismo, sino que se utiliza con el objetivo de reducir la exposición de las personas a contaminantes en un área específica mediante la dilución de estos contaminantes a través de un sistema de escape. Este sistema está compuesto generalmente de ductos, ventiladores y chimeneas.



8.2. Control de material particulado

Los controles de material particulado se basan en dispositivos que permiten la recolección de polvo. Estos dispositivos operan de manera básica mediante la deposición del polvo en una superficie de recolección, reteniendo el depósito en la superficie y recuperándolo o eliminándolo mediante la eliminación del depósito recolectado.

Los mecanismos que se aplican en los recolectores más comúnmente utilizados son: la deposición por gravedad, intersección en la línea de flujo, deposición por inercia, deposición por difusión y la deposición electrostática.

8.2.1. Cámaras de asentamiento

La utilización de colectores, en este tipo de equipos, se basan en las fuerzas gravitacionales es económica y sencilla. Estos dispositivos consisten en un conducto con expansiones en las que se reduce la velocidad horizontal de las partículas, permitiendo que se sedimenten debido a la fuerza de gravedad.

La ecuación 8-1, permite calcular el tiempo de detención (residencia) del flujo del gas en la cámara (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

$$\theta = \frac{WLH}{Q} \quad (8-1)$$

Donde:

θ = Tiempo de detención, s.

L = Longitud de la cámara, m.

H = Altura de la cámara, m.

Q = Flujo, m³/s.

W = Ancho de la cámara, m.



La ecuación 8-2, permite el cálculo del porcentaje de eliminación de una partícula específica en una cámara de sedimentación (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

$$E = \left(\frac{V_t W L}{Q} \right) 100 \quad (8-2)$$

Donde:

E = Eficacia de eliminación de una partícula específica.

V_t = Velocidad terminal, m/s.

W = Ancho de la cámara, m.

L = Longitud de la cámara, m.

Q = Flujo, m³/s.

8.2.2. Separadores por inercia

Los separadores por inercia utilizan la diferencia de densidad entre el gas y las partículas que contienen. Esta diferencia es suficientemente alta para que las partículas se separen por medio de la inercia y no vuelvan a ser atrapadas por la corriente gaseosa. Los equipos comunes que utilizan este principio son los ciclones (Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles, 2019).

8.2.3. Ciclones

Un ciclón es, en esencia, un sedimentador en el cual la aceleración gravitacional se sustituye por la aceleración centrífuga. Los ciclones son los equipos más utilizados para la recolección de material particulado debido a la baja inversión que requiere su instalación. El gas cargado de polvo penetra tangencialmente en una cámara cilíndrica o cónica en uno o más puntos y sale a través de una apertura central. Debido a su inercia, las partículas de polvo tienden a desplazarse hacia la pared



exterior del separador, y luego son conducidas hacia un receptor (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

La determinación del tamaño adecuado de los ciclones, ecuación 8-3, se lleva a cabo mediante un factor de separación basado en el conocimiento de que la fuerza centrífuga aplicada a las partículas varía de acuerdo con el cuadrado de la velocidad de entrada y es inversamente proporcional al radio del ciclón (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

$$S = \frac{V_i^2}{r_c g} \quad (8-3)$$

Donde:

S = Factor de separación.

V_i = Velocidad de entrada del gas, m/s.

r_c = Radio del cilindro, m.

g = Aceleración de la gravedad, 9,806 m/s².

En general, en condiciones normales de operación de un ciclón, la fuerza o aceleración centrífuga de separación puede variar hasta cinco veces la fuerza de gravedad. En equipos de baja resistencia y gran diámetro, puede variar la gravedad hasta 2500 veces en unidades de alta resistencia. También se debe señalar que la entrada inmediata a un ciclón casi siempre es rectangular.

El cálculo de la pérdida de presión en un ciclón se lo realiza mediante la ecuación 8-4, (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

$$F = \frac{KB_c H_c}{D_e^2} \quad (8-4)$$



Donde:

F = Pérdida por fricción en el ciclón.

K = Constante empírica.

B_c = Ancho de la entrada de gas, m.

H_c = Altura de la entrada de gas, m.

D_e = Diámetro de la salida del gas, m.

Los ciclones presentan una de las limitaciones de su eficiencia de recolección, siendo muy baja para partículas menores de 5 μm y especialmente para partículas de 2 o 3 μm . A pesar de que los ciclones pueden ser utilizados para la recolección de partículas mayores a 200 μm , las cámaras de asentamiento por gravedad o los separadores sencillos por inercia son más eficientes y están sujetos a un proceso abrasivo menor (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

La determinación de la eficacia de un sistema ciclónico se lleva a cabo mediante el cálculo del tamaño de corte con una eficacia del 50% utilizando la ecuación 8-5, (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

$$d_c = \left[\frac{9\mu B_c}{2\pi N V_i (p_p - p_g)} \right]^{0,5} \quad (8-5)$$

Donde:

d_c = Diámetro de las partículas que recogen con un 50 por 100 de eficacia, μm .

μ = Viscosidad del gas, kg/ms.

B_c = Anchura de la entrada de gas, m.

N = Número efectivo de giros del gas.

V_i = Velocidad de entrada del gas, m/s.

p_p = Densidad de las partículas, kg/m^3 .

p_g = Densidad del gas, kg/m^3 .



8.2.4. Colectores húmedos

Los colectores húmedos, aumentan el tamaño de las partículas utilizando pequeñas gotas de agua, permitiendo realizar con mayor facilidad la recolección de partículas más grandes.

8.2.4.1. Lavador de gases tipo convencional

En estos equipos las gotas de agua fluyen en sentido contrario al material particulado contenido en los gases, lo cual provoca el choque entre las mismas.

Las desventajas de este tipo de sistemas son: la necesidad de incorporar sistemas de tratamiento del residual líquido antes de verterlo hacia el exterior debido al contenido de las partículas recolectadas. Además, no todas las veces se provocan el choque entre partículas y gotas de agua debido a la tensión superficial del líquido utilizado y la humectabilidad de las partículas. Esto requiere la introducción de sustancias químicas para reducir la tensión superficial y aumentar las colisiones efectivas. A pesar de esto, lo interesante de este tipo de sistemas es que su eficiencia puede llegar hasta el 95% para material particulado menor a 5 μm (Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles, 2019).

8.2.4.2. Lavadores de lecho compacto

Los lavadores de lecho compacto son equipos que ingresan el líquido de lavado por la parte superior de la unidad, el mismo que, es distribuido uniformemente hasta llegar al lecho compacto.



8.2.4.3. Lavador de gases tipo Venturi

En este tipo de lavadores se aprovecha el efecto conocido como Venturi, en el cual las partículas se aceleran en una garganta tipo Venturi y luego desaceleran rápidamente cuando la corriente de gases se expande. El líquido se inyecta en una corriente continua perpendicular al flujo de gas. Las partículas contenidas en los gases quedan atrapadas con las gotas del líquido debido al choque entre ellas al formarse las gotas de líquido. Las altas velocidades relativas entre el gas y la corriente de líquido hacen que esta última se desintegre y forme gotas. La eficiencia de los lavadores de gases tipo Venturi es cercana al 99%, y son capaces de recolectar partículas de hasta 1 μm (Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles, 2019).

8.2.5. Separadores por colisionador

Los separadores por colisionador eliminan las partículas mediante la interacción entre las partículas y el equipo, similar a como lo hacen los separadores por inercia. La diferencia es que, en estos equipos, la corriente gaseosa fluye a través de cojines de mallas, provocando el choque de las partículas contenidas en el gas con los filamentos individuales de cada malla (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

8.2.6. Filtros de tela o mangas

Este tipo de equipos son como aspiradoras a gran escala y se utilizan para la extracción de partículas de corrientes secas y a baja temperatura (desde 0 °C a 275 °C). Se suspenden mangas de tela de 10 a 30 cm de diámetro en una cámara, y forzar el aire a pasar a través de este medio filtrable antes de ser descargado. Existen diferentes tipos de telas para filtros, cada una con sus propias características y propiedades. A continuación, se describen las características de algunos de los tipos de telas para filtros más comunes:



El algodón es una fibra natural que se obtiene de la planta de algodón. Es una tela suave y resistente, con una buena resistencia a la abrasión. Sin embargo, tiene una baja resistencia a los ácidos minerales y una buena resistencia a los ácidos orgánicos y las bases. La temperatura máxima de funcionamiento del algodón es de 82,2 °C.

La lana es una fibra natural obtenida de la lana de las ovejas. Es una tela resistente, con cierta resistencia a la abrasión y a los ácidos minerales. Sin embargo, tiene una cierta resistencia a los ácidos orgánicos y una baja resistencia/cierta resistencia a las bases. La temperatura máxima de funcionamiento de la lana es de 93,3 °C.

El modacrílico, también conocido como Dynel, es una fibra sintética. Es una tela resistente, con cierta resistencia a la abrasión y una muy buena resistencia a los ácidos minerales y orgánicos y una buena resistencia a las bases. La temperatura máxima de funcionamiento del modacrílico es de 79,4 °C.

El polipropileno es una fibra sintética. Es una tela resistente, con una excelente resistencia a la abrasión, los ácidos minerales, los ácidos orgánicos y las bases. Sin embargo, tiene una buena resistencia a los disolventes. La temperatura máxima de funcionamiento del polipropileno es de 93,3 °C.

La poliamida de nylon es una fibra sintética, también conocida como Nylon 6 y 66. Es una tela resistente, con una baja resistencia a los ácidos minerales, una cierta resistencia a los ácidos orgánicos, una muy buena resistencia a las bases y una excelente resistencia a los disolventes. La temperatura máxima de funcionamiento de la poliamida de nylon es de 104,4 °C.

El acrílico, también conocido como Orión, es una fibra sintética. Es una tela resistente, con una buena resistencia a la abrasión, los ácidos minerales, los ácidos



orgánicos y una cierta resistencia a las bases. Sin embargo, tiene una excelente resistencia a los disolventes. La temperatura máxima de funcionamiento del acrílico es de 126,67 °C.

El poliéster es una fibra sintética, también conocida como Dacrón y Creslan. Es una tela resistente, con una excelente resistencia a la abrasión, una buena resistencia a los ácidos minerales, los ácidos orgánicos, las bases y los disolventes. La temperatura máxima de funcionamiento del poliéster es de 135 °C.

El nylon aromático, también conocido como Nomex, es una fibra sintética. Es una tela resistente, con una excelente resistencia a la abrasión, una cierta resistencia a los ácidos minerales, una buena resistencia a los ácidos orgánicos, una muy buena resistencia a las bases y una excelente resistencia a los disolventes. La temperatura máxima de funcionamiento del nylon aromático es de 232,2 °C.

El fluorocarbono, también conocido como Teflón y TFE, es una fibra sintética. Es una tela resistente, con cierta resistencia/buena resistencia a la abrasión, una excelente resistencia a los ácidos minerales, los ácidos orgánicos, las bases y los disolventes. La temperatura máxima de funcionamiento del fluorocarbono es de 260°C.

La fibra de vidrio es una fibra sintética que se obtiene a partir de vidrio fundido. Es una tela resistente, con una excelente resistencia a la abrasión, los ácidos minerales, los ácidos orgánicos, las bases y los disolventes. Sin embargo, tiene una baja resistencia a las altas temperaturas. La temperatura máxima de funcionamiento de la fibra de vidrio es de 600 °F (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

Las características del gas, las partículas, y las características fisicoquímicas y temperatura de estos son los factores que determinan la selección del material de las mangas. Los materiales más comúnmente utilizados son el algodón, las fibras



sintéticas y el vidrio. La porosidad de la tela puede ser de hasta 100 μm de apertura, pero si se maneja correctamente, este tipo de colectores puede tener eficiencias cercanas al 99% para partículas menores a 1 μm .

8.2.7. Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos utilizan una diferencia de voltaje tan alta como sea posible entre un electrodo y placas colectoras. El principio de funcionamiento se basa en que la diferencia de potencial desprende electrones y los adhiere a las partículas, dotándolas de carga. A través de fuerzas electrostáticas, estas partículas son transferidas hacia las placas colectoras. Cuando entran en contacto con las placas colectoras, se adhieren a ellas. Con el tiempo, esta capa de partículas se convierte en un manto aislante cuyo valor de carga superficial puede aproximarse al del electrodo. Por lo tanto, las placas verticales son golpeadas para limpiar el manto y hacer que las partículas se deslicen hacia abajo y sean recolectadas en una tolva para su posterior eliminación.

En un sistema de precipitador eléctrico, la longitud horizontal de las planchas de recolección se encuentra en el rango de 0,5-1,0 veces la altura vertical de las planchas de recolección, que se encuentra entre 3,7-7,3 m. La separación entre las planchas de recolección es de 20-28 cm. El tiempo de tratamiento en el sistema es de 2-10 s, mientras que la velocidad a través del precipitador es de 1-2 m/s. La velocidad de deriva de las partículas (W) se encuentra en el rango de 0,03-0,18 m/s. El voltaje aplicado es de 30-75 KV, mientras que la corriente de la corona es de 0,03-3,3 mA/m. La intensidad del campo se encuentra entre 2,7-5,9 KV/cm. La temperatura del gas, estándar, puede alcanzar hasta 370 °C. La eficacia del sistema se encuentra en el rango de 90-99,9% (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).



8.3. Control de emisión de gases

El control de la emisión de gases indeseables tiene cuatro mecanismos fundamentales: la reducción o eliminación de gases, la provocación de reacciones de los gases después de su generación mediante procesos químicos para transformarlos en otras especies químicas menos nocivas, la realización de la extracción selectiva de un determinado compuesto de la corriente gaseosa por medio de la absorción, es decir, mediante la transferencia de moléculas gaseosas a un líquido y la realización de la extracción selectiva de un determinado compuesto de la corriente gaseosa mediante la adsorción, es decir, la deposición de las moléculas gaseosas en una superficie sólida.

8.3.1. Absorción para gases tóxicos

La absorción de gases tóxicos se lleva a cabo en torres rociadoras, permitiendo la extracción selectiva de un compuesto específico de una mezcla de gases y son similares a los lavadores de gases de baja presión. Este tipo de equipos son frecuentemente utilizados en la remoción del dióxido de azufre en altas concentraciones y en la absorción del dióxido de carbono en líquidos.

8.3.2. Adsorción para gases tóxicos

Los procesos de adsorción de gases se llevan a cabo al pasar los gases a través de un lecho de adsorbente sólido, en el que el adsorbente es seleccionado de acuerdo con su capacidad de recolección del gas deseado. En muchos casos, el calor de adsorción se libera y el sólido se calienta, lo que en algunos casos provoca la ignición del lecho. Las propiedades físicas y químicas del adsorbente sólido son determinantes para su selección, especialmente el área de superficie de los poros y fisuras de las partículas sólidas donde se deposita el gas. Uno de los usos más comunes de la adsorción de gases es la remoción de ácido sulfhídrico en altas concentraciones.



8.3.3. Incineración de emisiones gaseosas

Este tipo de control de emisiones gaseosas se utiliza principalmente en fuentes de naturaleza industrial. Consiste en oxidar los contaminantes mediante el proceso térmico denominado incineración. Este es el caso de los gases residuales que desprenden en los procesos de la industria petrolera, específicamente el proceso de refinación. En este proceso, las emisiones de gases inflamables y compuestos orgánicos volátiles son combustionadas para evitar explosiones súbitas o la formación del esmog fotoquímico.

El diseño de un sistema de incineración térmica requiere una cuidadosa consideración de las variables de temperatura de combustión y tiempo de residencia para lograr los niveles de eficiencia de destrucción deseados, especialmente en función del tipo de compuestos que se están quemando. A continuación, se describen las variables de diseño para lograr diferentes niveles de eficiencia de destrucción en diferentes condiciones de combustión: para lograr una eficiencia de destrucción del 98%, se requiere una temperatura de combustión de 870 °C y un tiempo de residencia de 0,75 segundos para el flujo con no halogenados. A medida que aumenta la eficiencia de destrucción requerida al 99%, también aumenta la temperatura de combustión a 980 °C y se mantiene el mismo tiempo de residencia de 0,75 segundos para el flujo con no halogenados. Para los flujos con halogenados, se requiere una temperatura de combustión de 1100 °C y un tiempo de residencia de 1,0 segundos para lograr una eficiencia de destrucción del 98%. Para lograr una eficiencia de destrucción del 99%, se requiere una temperatura de combustión de 1200 °C y un tiempo de residencia de 1,0 segundos (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).



8.3.4. Sistemas de oxidación catalítica

Los sistemas de oxidación catalítica son equipos que funcionan de manera similar a los sistemas de oxidación térmica o incineración de emisiones gaseosas. Su principio de funcionamiento se basa en producir una oxidación de los contaminantes para convertirlos en compuestos químicos que tengan un menor grado de afectación al ambiente. Para lograr esto, utilizan un catalizador, que generalmente son metales preciosos como el platino o el paladio.

8.3.5. Biofiltración de compuestos gaseosos

La biofiltración es un método de control que utiliza microorganismos ubicados en filtros por donde pasa la corriente gaseosa para degradar los contaminantes de interés en productos finales de sales inorgánicas, material celular, dióxido de carbono (CO₂) y agua. El objetivo de diseñar estos equipos es lograr una alta eficiencia a bajos costos, ya que en teoría o en la práctica pueden existir microorganismos que degraden los contaminantes existentes, pero su implementación no es factible debido a la relación costo-eficiencia.

8.3.6. Condensación de emisiones gaseosas

La condensación de emisiones gaseosas utiliza el cambio de fase de estado gaseoso a líquido. Este método de control se utiliza de dos maneras: en primer lugar, los gases contaminantes se condensan para separarlos de la corriente de aire final y desecharlos o transportarlos a un sistema de tratamiento de residuos líquidos. En segundo lugar, se utiliza para separar un compuesto específico de la corriente gaseosa antes de su ingreso a equipos de control más costosos. De esta manera, se logra alargar la vida útil de estos equipos o permitir su funcionamiento óptimo.



GLOSARIO

Aire. - También denominado “aire ambiente”, es cualquier porción no confinada de la atmósfera, y se define como la mezcla gaseosa, cuya composición normal es, de por lo menos veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y nueve por ciento (79%) de nitrógeno y uno por ciento (1%) de dióxido de carbono, además de las proporciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica. Para efectos de la corrección de las concentraciones de emisión sujetas bajo esta norma, se considera que la atmósfera se conforma de veinte y un por ciento (21%) de oxígeno y setenta y nueve por ciento (79%) de nitrógeno, en relación volumétrica (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

AM.- Son las siglas de Acuerdo Ministerial.

Ambiente.- Se entiende al ambiente como un sistema global integrado por componentes naturales y sociales, constituidos a su vez por elementos biofísicos, en su interacción dinámica con el ser humano, incluidas sus relaciones socioeconómicas y socioculturales (Código Orgánico del Ambiente, 2017).

Aseguramiento de la calidad.- Es un conjunto de actividades planificadas y sistemáticas que se llevan a cabo para garantizar que las metodologías y sus procesos involucrados cumplen con los estándares de calidad establecidos.

Balance de masa.- Es una técnica utilizada en ingeniería y ciencias ambientales para el análisis de sistemas que involucran flujos de materia. El objetivo del balance de masa es determinar la cantidad de materia que entra y sale de un sistema, y cómo se distribuye dentro del sistema. Para realizar un balance de masa, se debe establecer un sistema de referencia y determinar todas las entradas y salidas de materia del sistema. Las entradas pueden incluir materiales sólidos, líquidos o gaseosos, mientras que las



salidas pueden ser productos finales, residuos o emisiones al ambiente. También se deben considerar las reacciones químicas que puedan tener lugar dentro del sistema.

Base de datos.- Es un conjunto organizado y estructurado de información, que se almacena en un sistema informático y que puede ser accedido y utilizado por diferentes aplicaciones y usuarios. Las bases de datos son diseñadas para almacenar y gestionar grandes cantidades de información, de manera eficiente y segura. Una base de datos se compone de tablas o archivos que contienen registros con información específica y relacionada entre sí. Cada registro se compone de campos o atributos que definen las características de la información almacenada. Los registros y campos se relacionan entre sí de acuerdo con un esquema previamente definido, que define las reglas y la estructura de la base de datos.

Caldera. - Es el recipiente cerrado en donde se calienta agua, aceite u otra sustancia; a fin generar vapor o de transferir calor, que se puede utilizar para generar electricidad u otros fines industriales. Consiste en dos componentes: hogar, el cual provee de calor, usualmente por la quema de combustible; y el caldero, en el cual el calor produce el cambio de fase de agua a vapor o transmite la energía calorífica (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Calidad del aire.- Se refiere a la medida de la pureza del aire en términos de la cantidad y concentración de contaminantes presentes en él. La calidad del aire puede verse afectada por diferentes factores, como la actividad humana, las emisiones industriales, la quema de combustibles fósiles, el tráfico vehicular, la agricultura y la quema de biomasa.

Celda electroquímica. - Es una parte del analizador portátil de gases, que mide el gas de interés mediante reacción electroquímica que genera una diferencia de potencial proporcional a la concentración de dicho gas (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Chimenea.- Es el conducto que facilita el transporte hacia la atmósfera de los productos de la combustión generados en la fuente fija (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Combustibles alternativos. - Desechos con valor de energía recuperable, utilizados como combustible (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Combustibles convencionales. - Son los combustibles fósiles como el gas natural, carbón mineral y los derivados del petróleo (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Combustibles fósiles. - Son los hidrocarburos encontrados en estado natural, como el petróleo, carbón, gas natural; y sus derivados (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Combustibles fósiles gaseosos. - Son aquellos derivados del petróleo o del gas natural, tales como butano, propano, metano, isobutano, propileno, butileno o cualquiera de sus combinaciones (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Combustibles fósiles líquidos. - Son aquellos derivados del petróleo, tales como el diésel, fuel oil, kerosene, naftas. Incluye también al petróleo crudo (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Combustibles fósiles sólidos. - Se refiere a las variedades de carbón mineral cuyo contenido fijo de carbono varía desde 10% a 90% en peso y al coque de petróleo (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Combustión. - Es el proceso de oxidación rápida que consiste en una combinación del oxígeno con aquellos materiales o sustancias capaces de oxidarse, dando como resultado la generación de gases, partículas, luz y calor (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Compuestos Orgánicos Volátiles. - Los compuestos orgánicos volátiles (COVs) son contaminantes peligrosos del aire. Su importancia radica en su capacidad como precursores del ozono troposférico y su papel como destructores del ozono estratosférico. Los COVs reaccionan con óxidos de nitrógeno para formar ozono y partículas ultrafinas, componentes del smog que afectan a la salud humana, la vegetación y el clima. La oxidación de los COV también favorece la formación de aerosoles orgánicos secundarios, que constituyen un importante manantial de partículas finas en suspensión o PM_{2,5}. La exposición a las PM_{2,5} representa otro grave problema que afecta a la salud pública.

Concentración de una sustancia en el aire. - Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia, y la unidad de volumen de aire en el cual está contenida (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Condiciones de referencia. - Para efectos de esta Norma, debe entenderse a veinticinco grados centígrados (25 °C) de temperatura, y setecientos sesenta milímetros de mercurio de presión (760 mm Hg) (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Condiciones normales. - Esta condición se utiliza para reportar las concentraciones en base seca de emisión establecidos en la presente norma, a cero grados centígrados (0 ° C) y setecientos sesenta milímetros de mercurio de presión (760 mm Hg) (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Contaminación del aire. - Es la presencia de sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración suficiente, por un tiempo suficiente y bajo circunstancias tales que interfieren con el confort, la salud o el bienestar de los seres humanos o del ambiente (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Contaminante criterio del aire. - Es cualquier contaminante del aire para el cual se especifica en la normativa aplicables, un valor máximo de concentración permitida a nivel del suelo en el aire ambiente, y por lo tanto afecta a los receptores, ya sean personas, animales, vegetación, o materiales, para diferentes periodos de tiempo (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Contaminante peligroso del aire (no convencionales).- Son aquellos contaminantes del aire que pueden presentar una amenaza de efectos adversos en la salud humana o en el ambiente (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Contaminantes primarios del aire. - Son aquellos contaminantes que se emiten directamente desde una fuente, ya sea natural o de origen antropogénico.

Contaminantes secundarios del aire.- Son aquellos contaminantes que no se emiten de forma directa, sino que se generan a partir de reacciones químicas que ocurren una vez que los contaminantes primarios están en el aire y se combinan con otras sustancias.

Corrección de concentración de emisiones. - Para la verificación del cumplimiento de los límites establecidos en esta Norma, las concentraciones de emisión medidas deben previamente corregirse, considerando el porcentaje de oxígeno (O₂) que se indique en cada caso (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Diámetro aerodinámico.- Para una partícula específica, es el diámetro de una esfera con densidad unitaria (densidad del agua) que se sedimenta en aire quieto a la misma velocidad que la partícula en cuestión (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Dióxido de azufre (SO₂). - Es un gas incoloro e irritante formado principalmente por la oxidación del azufre de combustibles fósiles (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Emisión.- Se entiende por tal a la descarga de sustancias gaseosas puras o con sustancias en suspensión en la atmósfera. Para el propósito de esta norma, la emisión se refiere a las concentraciones de descarga de sustancias provenientes de actividades humanas (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Emisión de combustión.- Es la emisión de contaminantes al aire debido al aprovechamiento energético de combustibles (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Emisión de proceso.- Es la emisión de contaminantes al aire que son inherentes al proceso productivo, y que no corresponden a gases o subproductos de combustión (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Episodio crítico de contaminación del aire.- Es la presencia de altas concentraciones de contaminantes criterio del aire y por períodos cortos de tiempo, como resultado de condiciones de emisiones de gran magnitud y/o meteorológicas desfavorables que impiden la dispersión de los contaminantes previamente emitidos (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Error aleatorio.- Es un error que se produce de manera aleatoria y que se debe a la variabilidad intrínseca de la medición o de los instrumentos de medición utilizados. Este error es impredecible y no se puede eliminar completamente, pero se puede reducir mediante la repetición de las mediciones y el cálculo del promedio.

Error sistemático.- Es un error que se produce de manera constante y que se debe a una causa específica, como una calibración incorrecta del instrumento de medición, una lectura incorrecta de los datos, o una interferencia en el proceso de medición. Este error se puede corregir mediante la identificación y eliminación de la causa del error, o mediante la aplicación de una corrección adecuada.

Flujo laminar. – En la dinámica de fluidos, este flujo se caracteriza por trayectorias suaves o regulares de partículas del fluido. El fluido fluye en capas paralelas (con una mezcla lateral mínima), sin interrupción entre las capas.

Flujo turbulento. – En la dinámica de fluidos, este flujo se caracteriza por el movimiento irregular de partículas del fluido. El fluido turbulento no fluye en capas paralelas, la mezcla lateral es muy alta y hay una interrupción entre las capas.

Flujo volumétrico.- Es la cantidad de volumen de un fluido que pasa por una sección transversal en una unidad de tiempo. Se mide en unidades de volumen por unidad de tiempo, como litros por segundo, metros cúbicos por hora, pies cúbicos por minuto, entre otras.

Fracción molar.- Es una unidad química que se usa para expresar la concentración de un soluto en una disolución. Se define como el cociente entre los moles de soluto y el total de moles de la disolución, que se calcula sumando los moles de soluto y de solvente. La fracción molar se puede utilizar para calcular la concentración de un contaminante en el aire. Por ejemplo, si se tiene una muestra de aire que contiene una mezcla de gases y se conoce el número de moles de cada gas en la muestra, se puede



calcular la fracción molar de cada gas dividiendo el número de moles del gas por el número total de moles en la muestra. De esta manera, se puede determinar la proporción del contaminante en relación con los demás gases presentes en la muestra.

Fuente fija de combustión abierta.- Es la instalación o conjunto de instalaciones , que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, que emite o puede emitir contaminantes al aire debido a proceso de combustión, en los que no se pueden controlar el ingreso del aire a la fuente, desde un lugar fijo o inamovible (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Fuente fija de combustión.- Es aquella Instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, que emite o puede emitir contaminantes al aire debido a procesos de combustión, desde un lugar fijo e inamovible (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Fuente fija existente.- Es aquella instalación o conjunto de instalaciones en operación, o que cuenta con autorización para operar, por parte de la Autoridad Ambiental de Control, antes de la publicación de la reforma de esta norma (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Fuente fija nueva con autorización de entrar en funcionamiento.- Es aquella instalación o conjunto de instalaciones con autorización de entrar en funcionamiento que haya iniciado su proceso de regularización ambiental y que cuente con la licencia ambiental correspondiente a partir de la publicación de la reforma de la norma (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Incertidumbre.- Es la falta de certeza o seguridad sobre un resultado o medida, que puede ser causada por diversos factores, como la limitación de los instrumentos de medición, la variabilidad inherente de un proceso o la falta de información completa o precisa.

INEN.- Son las siglas del Servicio Ecuatoriano de Normalización. Es el organismo nacional de normalización del Ecuador y también está a cargo de la regulación técnica y la metrología.

Inventario de emisiones.- Es un documento que recopila y cuantifica las emisiones de contaminantes producidas por una fuente o grupo de fuentes durante un período de tiempo específico. Este tipo de inventario se utiliza comúnmente para evaluar la magnitud y el impacto de las emisiones en la calidad del aire y el medio ambiente. Los inventarios de emisiones suelen incluir información detallada sobre los contaminantes emitidos, la cantidad de emisiones producidas, el tipo y la cantidad de combustibles utilizados, las tecnologías de control de emisiones utilizadas y otros factores relevantes. También pueden incluir información sobre la ubicación y la distribución geográfica de las fuentes de emisión, así como los patrones de emisión a lo largo del tiempo.

ISO.- Son las siglas de International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización, en español). La ISO es una organización no gubernamental, independiente y sin fines de lucro que se dedica a desarrollar y publicar normas internacionales para diversas áreas de actividad económica y tecnológica.

Línea base.- Denota el estado de un sistema alterado en un momento en particular, antes de un cambio posterior. Se define también como las condiciones en el momento de la investigación dentro de un área que puede estar influenciada por actividades humanas (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Límite Máximo permisible.- Para la aplicación de esta norma, es el valor que establece la máxima concentración de descarga permisible de los contaminantes al aire, provenientes de una fuente fija (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Línea de muestreo.- Es el eje en el plano de muestreo a lo largo del cual se localizan los puntos de medición, y está limitada por la pared interna de la chimenea o conducto (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Lluvia ácida. - Es un término amplio que incluye cualquier forma de precipitación con componentes ácidos (como el ácido sulfúrico o nítrico) que cae al suelo desde la atmósfera en forma húmeda o seca. Se forma cuando la humedad del aire se combina principalmente con óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre o trióxido de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas, calderas de calefacción y vehículos que queman carbón o productos derivados del petróleo que contengan azufre.

Masa molar.- Es la masa de una molécula o compuesto expresada en gramos por mol. Es una propiedad física importante que se utiliza en química y otras ciencias para calcular la cantidad de una sustancia presente en una muestra.

Material particulado.- Se refiere al constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, emitido por la fuente fija hacia la atmósfera (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Micra o micrón.- Es la millonésima parte de un metro, o la milésima parte de un milímetro.



Modelo de dispersión.- Es la representación matemática para describir el comportamiento y estimar la concentración de los contaminantes en la atmósfera, que se emiten desde una o varias fuentes de emisión, bajo condiciones meteorológicas y topográficas determinadas (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Monitoreo. - Se refiere a la observación y registro sistemático y continuo de un fenómeno o proceso en particular. En términos generales, se trata de una actividad que implica la medición y evaluación de datos en un intervalo de tiempo específico para poder detectar cambios o variaciones significativas y así tomar decisiones o acciones en consecuencia.

Monitoreo de emisiones.- Es el proceso programado de coleccionar muestras, efectuar mediciones, y realizar el correspondiente registro de las emisiones de fuentes fijas, a fin de verificar el cumplimiento de los límites de concentración de emisiones establecidos en la Norma (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Monóxido de carbono (CO).- Es un gas incoloro, inodoro y tóxico, producto de la combustión incompleta de los combustibles (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Motor de combustión interna.- Es un tipo de motor que convierte la energía química de la combustión en energía mecánica a través de un proceso de combustión dentro del motor. Este tipo de motor se utiliza comúnmente en vehículos, aviones, barcos, generadores y otros dispositivos que requieren una fuente de energía mecánica. Los motores de combustión interna funcionan mediante la combustión de un combustible dentro de una cámara de combustión, lo que produce gases calientes que se expanden y empujan un pistón hacia abajo. Esta acción del pistón se convierte en movimiento rotativo a través de un sistema de bielas y cigüeñal, que a su vez se utiliza para



impulsar las ruedas del vehículo o cualquier otro dispositivo que esté conectado al motor. Existen varios tipos de motores de combustión interna, incluyendo motores de gasolina, diésel, gas natural y otros combustibles. Cada tipo de motor tiene sus propias características y beneficios, y se utiliza en diferentes aplicaciones según las necesidades de energía y eficiencia requeridas

Muestreo.- Es un proceso de selección de una muestra representativa de un conjunto más grande de datos o población. En otras palabras, el muestreo implica tomar una porción de un todo para obtener información sobre el conjunto completo. El objetivo del muestreo es obtener una muestra que sea lo más representativa posible de la población en cuestión, para poder hacer inferencias y generalizaciones acerca de ella.

Muestreo activo.- Son métodos de medición de la concentración de contaminantes atmosféricos que utiliza dispositivos de muestreo que requieren de un flujo de aire forzado para capturar las partículas y gases presentes en el aire. En el muestreo activo, el aire es succionado a través de un dispositivo de muestreo, que generalmente está compuesto por un filtro y un equipo de medición. Los contaminantes atmosféricos se depositan en el filtro durante un período de tiempo determinado, después del cual el filtro se envía a un laboratorio para su análisis. Los dispositivos de muestreo activo son muy útiles para medir la concentración de contaminantes atmosféricos en tiempo real y se utilizan ampliamente en estudios de calidad del aire en exteriores y en la evaluación de emisiones de fuentes fijas y móviles de contaminantes. Estos dispositivos también pueden proporcionar información sobre la distribución espacial y temporal de los contaminantes, lo que puede ser importante para la toma de decisiones y la implementación de medidas de control de la contaminación.

Muestreo isocinético.- Es el muestreo en el cual la velocidad y dirección del gas que entra en la sonda de muestreo son las mismas que las del gas en el conducto o chimenea (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015). El muestreo isocinético es una técnica utilizada para extraer una



muestra representativa de procesos como las emisiones de gases a la atmósfera desde chimeneas, conductos o escapes de procesos. La concentración de un contaminante se mide extrayendo un volumen conocido del flujo de gas y determinando la tasa promedio de flujo del gas en la chimenea durante el período de muestreo. Luego se puede calcular la tasa de emisión masiva de cada constituyente. Además, el muestreo isocinético se utiliza para calibrar contra métodos de referencia estándar (SRM) utilizando análisis gravimétrico bajo condiciones controladas.

Muestreo pasivo.- Son métodos de medición de la concentración de contaminantes atmosféricos que utiliza dispositivos de muestreo que no requieren de un flujo de aire forzado. Estos dispositivos, conocidos como dispositivos de muestreo pasivos, permiten la captura de gases y partículas presentes en el aire de forma pasiva, sin necesidad de energía o equipos adicionales. Los dispositivos de muestreo pasivos suelen ser dispositivos pequeños y de bajo costo que contienen materiales absorbentes o adsorbentes que permiten la captura de los contaminantes. Los contaminantes se acumulan en el material de muestreo durante un período de tiempo determinado, después del cual el material se envía a un laboratorio para su análisis. Los dispositivos de muestreo pasivos son útiles en la medición de contaminantes atmosféricos de baja concentración y se utilizan ampliamente en estudios de calidad del aire en interiores y exteriores.

NTE.- Son las siglas de la Norma Técnica Ecuatoriana.

Puertos de muestreo.- Son los orificios circulares en las chimeneas o conductos para facilitar la introducción de los dispositivos necesarios para la medición y toma de muestras (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).



Puntos de medición.- Son puntos específicos localizados en las líneas de muestreo, en los cuales se realizan las mediciones y se extraen las muestras respectivas (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Óxidos de nitrógeno (NO_x).- Es la suma del óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El NO es un gas incoloro que se genera por la combinación del nitrógeno (N₂) y del oxígeno (O₂) de la atmósfera durante los procesos de combustión, El NO₂, que se forma a partir de la oxidación del NO (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Material particulado fino (PM_{2,5}). - Es el material sólido o líquido, cuyas partículas presentan un diámetro menor a 2,5 micras (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Material particulado (PM₁₀).- Es el material sólido o líquido, cuyas partículas presentan un diámetro menor a 10 micras. La fracción correspondiente a tamaños entre 2,5 y 10 micras (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Nivel de fondo (background).- Expresa las condiciones ambientales imperantes antes de cualquier perturbación originada en actividades humanas, esto es, sólo con los procesos naturales en actividad (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Norma de calidad de aire ambiente o nivel de inmisión.- Es el valor que establece el límite máximo permisible de concentración, a nivel de suelo, de un contaminante del aire durante un tiempo promedio de muestreo determinado, definido con el propósito de proteger la salud y el ambiente. Los límites permisibles descritos en esta norma de calidad de aire ambiente se aplicarán para aquellas concentraciones de



contaminantes que se determinen fuera de los límites del predio de los sujetos de control o regulados (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Norma de emisión.- Es el valor que señala la descarga máxima permisible de los contaminantes del aire definidos, provenientes de una fuente fija o móvil (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Olor ofensivo.- Es el olor, generado por sustancias o actividades industriales, comerciales o de servicio, que produce molestia, aunque no cause daño a la salud humana (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Partículas Sedimentables.- Material particulado, sólido o líquido, en general de tamaño mayor a 10 micrones; por su peso tienden a precipitarse con facilidad, razón por lo cual pueden permanecer en suspensión temporal en el aire ambiente (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Ozono (O₃). - El ozono (O₃) es un gas altamente reactivo compuesto por tres átomos de oxígeno. Es tanto un producto natural como artificial que se encuentra en la atmósfera superior de la Tierra (la estratósfera) y en la atmósfera inferior (la tropósfera). Para efectos de la normativa ambiental, es un contaminante secundario del aire, que se genera por las reacciones fotoquímicas de los NO_x y compuestos orgánicos volátiles (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

Red de monitoreo.- Es un conjunto de estaciones o puntos de muestreo ubicados en una zona geográfica específica y diseñados para medir y recopilar datos de un parámetro o conjunto de parámetros de interés. En la calidad del aire, una red de monitoreo puede consistir en una serie de estaciones ubicadas estratégicamente para



medir los niveles de contaminantes atmosféricos en una ciudad o región. Estas estaciones de monitoreo pueden medir diversos contaminantes, como partículas finas, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono, entre otros.

Registro Oficial.- Es el medio de publicación de las leyes, decretos y otras normas jurídicas emanadas de las funciones del Estado y los Gobiernos Autónomos Descentralizados del Ecuador.

Sensor meteorológico. - Es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud meteorológica y transformarla en otra, en muchos casos eléctrica, que se pueda cuantificar y procesar para facilitar su comprensión. Los sensores meteorológicos son parte del sistema de medición que se integra en las estaciones meteorológicas.

TULSMA.- Son las siglas del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.

Turbina a gas de combustión. - Motor de combustión interna, conformado por tres componentes: compresor, cámara de combustión y turbina de potencia. La última se acciona por los gases de combustión. Puede utilizar combustibles líquidos o gaseosos (Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015).

US EPA.- Son las siglas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.

Viscosidad.- La viscosidad es una propiedad física característica de todos los fluidos. Se refiere a la resistencia que poseen algunos líquidos durante su fluidez y deformación. Mientras más resistencia posee un líquido para fluir y deformarse, más viscoso es.



Bibliografía

- Acuerdo Ministerial 061, Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. (4 de Mayo de 2015). *Registro Oficial Edición Especial 316*. Quito.
- Acuerdo Ministerial 097 A, Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria. (4 de Noviembre de 2015). *Registro Oficial Edición Oficial 387*. Quito.
- Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles*. (2019). IntechOpen.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73722>
- Apex Instrument. (2022). *Apex Instrument*. Retrieved 2022 de Agosto de 19, from Equipment Catalog: <http://www.apexinst.com/>
- Code of Federal Regulations. (11 de Agosto de 2022). *Electronic Code of Federal Regulations. Title 40: Protection of Environment. Part 60 – Standards of Performance for New Stationary Sources*. Retrieved 11 de Agosto de 2022, from <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=c7836e6ff67e5ad001bcb19ccfd99c1a&node=40:8.0.1.1.1&rgn=div5#40:8.0.1.1.1.0.1.1.3>
- Código Orgánico del Ambiente. (12 de Abril de 2017). *Registro Oficial Suplemento 983*. Quito.
- Comisión Europea. (2023). *Comisión Europea*.
<https://cordis.europa.eu/article/id/31117-how-natures-glue-affects-atmospheric-chemistry/es>
- E. Roberts Alley & Associates, Inc. (2001). *Manual de control de la calidad del aire*. México: McGraw-Hill.
- Earth Observation Center. (2020). *DLR - Earth Observation Center*.
<https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-5356/>
- Grijalbo Fernández, L. (2016). *Elaboración de inventarios de focos contaminantes UF1941*. La Rioja: Editorial Tutor Formación.



- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2000). *NTE INEN 2 202:2000. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de Diesel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre*. Quito: INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2003). *NTE INEN 2 349:2003. Revisión Técnica Vehicular. Procedimientos*. Quito: INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *NTE INEN 2 203:2013. Medición de Emisiones de Gases de Escape en Motores de Combustión Interna*. Quito: INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2017). *NTE INEN 2204:2017. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina*. Quito: INEN.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Resumen Técnico*: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>
- International Organization for Standardization. (Septiembre de 1999). *International Organization for Standardization*. Retrieved 14 de Octubre de 2022, from ISO 11614:1999 - Reciprocating internal combustion compression-ignition engines — Apparatus for measurement of the opacity and for determination of the light absorption coefficient of exhaust gas: <https://www.iso.org/standard/19551.html>
- International Organization for Standardization. (Diciembre de 2018). *International Organization for Standardization*. Retrieved 15 de Octubre de 2022, from ISO 14064-1:2018 - Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals: <https://www.iso.org/standard/66453.html>
- International Organization for Standardization. (Abril de 2019). *International Organization for Standardization*. Retrieved 15 de Octubre de 2022, from ISO 14064-2:2019 - Greenhouse gases — Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements: <https://www.iso.org/standard/66454.html>
- International Organization for Standardization. (Abril de 2019). *International Organization for Standardization*. Retrieved 15 de Octubre de 2022, from ISO 14064-3:2019 - Greenhouse gases — Part 3: Specification with guidance for



the verification and validation of greenhouse gas statements:
<https://www.iso.org/standard/66455.html>

International Organization for Standardization. (Junio de 2020). *International Organization for Standardization*. Retrieved 12 de Octubre de 2022, from ISO 8178-1:2020 - Reciprocating internal combustion engines — Exhaust emission measurement — Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions: <https://www.iso.org/standard/79330.html>

Jahnke, J. A. (2000). *Continuous Emission Monitoring*. John Wiley & Sons, Inc.

Londoño, C. A. (2019). *Contaminación Atmosférica*. Ediciones de la U.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2023). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia*. Contaminación Atmosférica: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

Ministerio del Ambiente de Perú. (2023). *Ministerio del Ambiente de Perú*. <https://infoaireperu.minam.gob.pe/gestion-calidad-del-aire/normativa/>

Ministerio del Medio Ambiente y Agua de Bolivia. (2023). *Ministerio del Medio Ambiente y Agua de Bolivia*. <http://snia.mmaya.gob.bo/web/modulos/PNGCA/#>

Mitchell, R., & Sweeney, F. (2018). *Air Pollution*. ED-Tech Press.

Ozono secretariat - UN environment programme . (2023). *Ozono secretariat - UN environment programme* . <https://ozone.unep.org/>

Parker, A. (2021). *Contaminación del Aire por la Industria*. Editorial Reverté S.A.

Spedding, D. (2021). *Contaminación Atmosférica*. Editorial Reverté S.A.

Steyn, D. G. (2016). *Air Pollution Modeling and its Application XXIV*. Springer.

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Particulate Matter (PM) Pollution*. <https://www.epa.gov/pm-pollution>

U.S. Environmental Protection Agency. (15 de Agosto de 2022). Retrieved 15 de Agosto de 2022, from Method 1— Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources: <https://www.epa.gov/emc/method-1-samplevelocity-traverses>



- U.S. Environmental Protection Agency. (28 de Julio de 2022). Retrieved 28 de Julio de 2022, from Method 1A—Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources With Small Stacks or Ducts: <https://www.epa.gov/emc/method-1a-small-ducts>
- U.S. Environmental Protection Agency. (30 de Agosto de 2022). *Air Emission Measurement Center (EMC)*. Retrieved 14 de Agosto de 2022, from <https://www.epa.gov/emc>
- U.S. Environmental Protection Agency. (18 de Agosto de 2022). *Method 2—Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot)*. Retrieved 18 de Agosto de 2022, from <https://www.epa.gov/emc/method-2-velocity-s-type-pitot>
- U.S. Environmental Protection Agency. (14 de Febrero de 2022). *Method 3 - Gas Analysis for the Determination of Dry Molecular Weight*. Retrieved 14 de Febrero de 2022, from <https://www.epa.gov/emc/method-3-molecular-weight>
- U.S. Environmental Protection Agency. (14 de Septiembre de 2022). *Method 4 — Determination of Moisture Content in Stack Gases*. Retrieved 14 de Septiembre de 2022, from <https://www.epa.gov/emc/method-4-moisture-content-0>
- U.S. Environmental Protection Agency. (14 de Septiembre de 2022). *Method 5 — Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources*. Retrieved 14 de Septiembre de 2022, from <https://www.epa.gov/emc/method-5-particulate-matter-pm>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air*. <https://www.epa.gov/co-pollution>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution*. <https://www.epa.gov/no2-pollution>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Sulfur Dioxide (SO2) Pollution*. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#effects>
- Wark, K., & Warner, C. (1990). *Contaminación del aire: origen y control*. México: Limusa.
- Werner, S., & Mainwaring, S. J. (2011). *Contaminación del aire / Air Pollution: Causas, efectos y soluciones*. México: Editorial Trillas Sa De Cv.



CIDE
EDITORIAL



ISBN: 978-9942-616-29-6



9789942616296