



Módulo 2:

Medición de Emisiones de SO₂

1.	OBJETIVOS	2
2.	ZONAS SATURADAS Y REGULACIÓN DE EMISIONES DE SO₂	2
3.	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE SO₂ Y MATERIAL PARTICULADO	2
4.	PRINCIPIOS DEL MÉTODO EPA-8.....	5
4.1.	Captura de los Contaminantes	5
4.2.	Análisis Químico de la Muestra	6
4.3.	Importancia del Muestreo Isocinético.....	6
5.	MÉTODOS COMPLEMENTARIOS DE MEDICIÓN	7
5.1.	CH-1: Localización de Puntos de Muestreo.....	7
5.2.	CH-2: Medición de Velocidad y Caudal de Gases	8
5.3.	CH-3: Análisis de Gases y Peso Molecular Seco	9
5.4.	CH-4: Determinación de Humedad en Gases de Chimenea.....	10
5.5.	EPA-8: Determinación de Emisiones de SO ₂ y Ácido Sulfúrico	10
6.	CONCLUSIÓN	11

1. Objetivos

- Abordar los métodos y normativas aplicadas para cuantificar las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) desde fuentes estacionarias.
- Determinar la correcta medición de este contaminante para cumplir con las regulaciones ambientales y mitigar su impacto en la calidad del aire.

2. Zonas Saturadas y Regulación de Emisiones de SO₂

La presencia de zonas saturadas por material particulado en el Valle Central de la Región del Maule, como Talca-Maule y Curicó, resalta la necesidad de monitorear y controlar las emisiones de SO₂. La acumulación de este contaminante contribuye a la mala calidad del aire, a la formación de material particulado (MP) y a otros fenómenos de alto impacto ambiental tales como la lluvia ácida.

Para reducir la contaminación por material particulado, los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) del Ministerio del Medio Ambiente han establecido límites estrictos de emisión para material particulado y de dióxido de azufre (SO₂), aplicados tanto a calderas nuevas como a calderas existentes. Además, se han determinado frecuencias de medición oficiales para garantizar el cumplimiento de estos límites. En particular, la medición de emisiones de SO₂ afecta solo a calderas que usan combustibles con azufre, tales como el carbón, el petróleo N°5 o el petróleo N°6, y los límites de emisión y frecuencia de medición depende de su potencia térmica. A modo de ejemplo, la siguiente figura muestra los límites establecidos en el anteproyecto de PDA para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule.

Tabla 1: Límite máximo de emisión de SO₂ para calderas nuevas y existentes.

Potencia térmica nominal de la caldera	Límite máximo de SO ₂ (mg/Nm ³)	
	Caldera Existente	Caldera Nueva
Igual o mayor a 3 MWt y menor a 20 MWt	400	400
Igual o mayor a 20 MWt	400	200

Elaboración propia basado en Anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule

Tabla 2: Frecuencia de la medición discreta de emisiones de MP y SO₂, según combustible utilizado

Tipo de combustible	Periodicidad de la medición en meses			
	Sector Industrial		Sector residencial, comercial e institución	
	MP	SO ₂	MP	SO ₂
Leña.	6	-	12	-
Petróleo N°5 y N°6.	6	6	12	12
Carbón.	6	6	12	12
Pellet, chips, aserrín, viruta, otros derivados de madera y otro tipo de biomasa vegetal, con carga manual de combustible.	12	-	12	-
Pellet, chips, aserrín, viruta, otros derivados de madera y otro tipo de biomasa vegetal, con carga automática de combustible.	24	-	24	-
Petróleo diésel.	24	-	24	-
Petróleo diésel con contenido de azufre menor a 15 ppm.	Exenta de verificar cumplimiento.			
Todo tipo de combustible gaseoso.	Exenta de verificar cumplimiento.			

Elaboración propia basado en Anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Macrozona del Valle Central de la Región del Maule

3. Métodos de Medición de SO₂ y Material Particulado

En Chile, la medición de emisiones contaminantes se realiza mediante métodos normalizados que permiten cuantificar su concentración en los gases de chimenea de fuentes estacionarias. Estos métodos incluyen, entre otros:

- **CH-5:** Determinación de emisiones de material particulado proveniente de fuentes estacionarias.
- **EPA-8:** Determinación de emisiones de dióxido de azufre y niebla de ácido sulfúrico desde fuentes estacionarias.

Ilustración 1: Métodos de medición de MP y SO₂

Analyte	CAS No.	Sensitivity
Sulfuric acid, including: Sulfuric acid (H ₂ SO ₄) mist, Sulfur trioxide (SO ₃)	7664-93-9, 7449-11-9	0.05 mg/m ³ (0.03 × 10 ⁻³ lb ft ⁻³)
Sulfur dioxide (SO ₂)	7449-09-5	1.2 mg/m ³ (3 × 10 ⁻³ lb ft ⁻³)

Fuente: ISPCH, 2020; EPA, 2019

Ambos métodos requieren una extracción isocinética de muestras desde la chimenea y un posterior análisis de muestras en el laboratorio, para determinar la concentración de SO₂ y otros contaminantes.

Tren de muestreo

Un tren de muestreo es un sistema compuesto por diferentes dispositivos y componentes diseñados para extraer, acondicionar y recolectar muestras de gases y partículas de una corriente de emisión, generalmente desde una chimenea o fuente fija. Su correcto diseño y operación permiten obtener mediciones representativas y precisas de los contaminantes presentes en los gases de combustión.

Ilustración 2: Tren de Muestreo para la medición de MP o SO₂



Fuente: Laboratorio Kipus

Los métodos CH-5 y EPA-8 son procedimientos normalizados para la medición de material particulado (MP) y dióxido de azufre (SO₂), respectivamente. Ambos métodos utilizan trenes de muestreo similares en su estructura básica, pero con diferencias en el tratamiento de la muestra y el tipo de contaminante que buscan analizar.

Independientemente del método utilizado, el tren de muestreo está compuesto por los siguientes elementos clave:

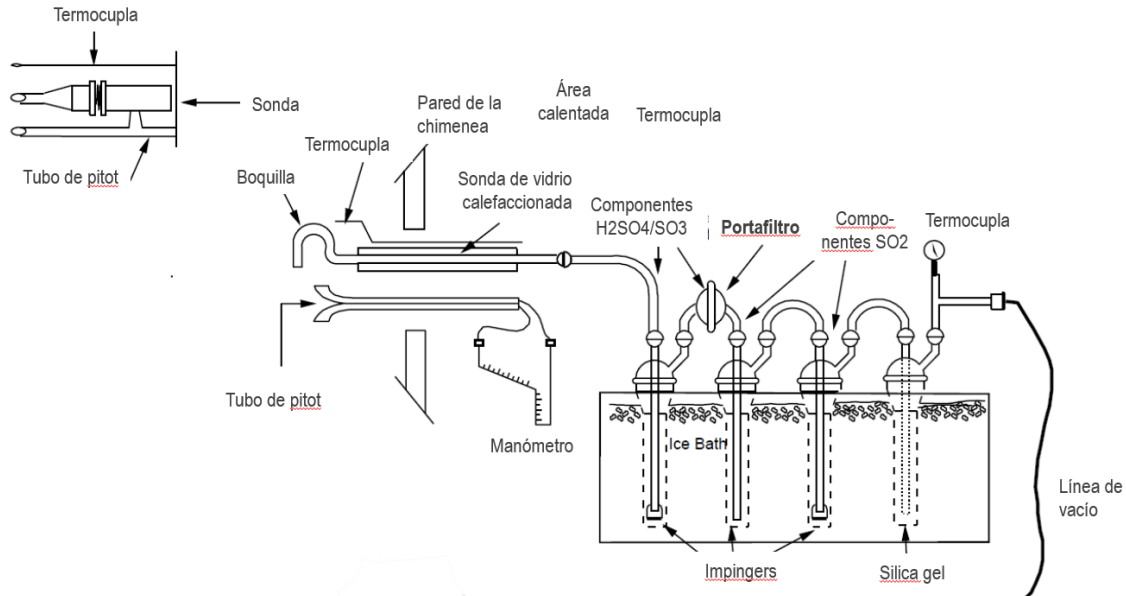
1. **Sonda de muestreo:** Conducto de material resistente a la temperatura (acero inoxidable o vidrio), que se introduce en la corriente de gases de chimenea para la extracción de la muestra.
2. **Tubo Pitot:** Dispositivo utilizado para medir la velocidad del gas y ajustar el caudal de muestreo.
3. **Portafiltro:** Contenedor donde se ubica un filtro de alta eficiencia que retiene las partículas presentes en la muestra.
4. **Impingers (captadores de gases solubles):** Recipientes de vidrio en serie con soluciones químicas específicas para absorber gases como SO₂ o niebla de ácido sulfúrico.
5. **Baño de hielo:** Mantiene fríos los impingers para mejorar la eficiencia de absorción de los gases disueltos.
6. **Bomba de vacío:** Controla el flujo de extracción de gases para garantizar un muestreo isocinético.
7. **Sistema de medición de temperatura y presión:** Incluye termocuplas y manómetros para monitorear las condiciones de muestreo.

El tren de muestreo del método CH-5 se enfoca en la captura de partículas en suspensión contenidas en los gases de chimenea. En este caso el filtro de fibra de vidrio es el elemento clave. No requiere captación de gases solubles, por lo que los impingers cumplen una función secundaria en la recolección de humedad. Y sí requiere calentamiento del filtro para evitar la pérdida de material volátil durante el proceso de muestreo.

A diferencia del CH-5, el tren de muestreo de EPA-8 se centra en la captura y análisis de contaminantes gaseosos en lugar de partículas sólidas, y sus principales características son las siguientes:

- El filtro no es el elemento principal: Si bien se emplea un filtro, su función es capturar aerosoles ácidos, no material particulado.
- La clave está en los impingers: Se utilizan soluciones químicas específicas para absorber los gases de interés:
 - SO_2 se captura en una solución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 3%).
 - La niebla ácida ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SO}_3$) se retiene en una solución de isopropanol al 80%.
- No requiere calentar el filtro, ya que la muestra se centra en compuestos gaseosos y no en partículas volátiles.
- Se utilizan técnicas de titulación química para determinar la concentración de SO_2 en la muestra, en contraste con la medición gravimétrica del CH-5.

Ilustración 3: Esquema del tren de muestreo para la medición de MP o SO_2



Fuente: Método Ch-5, ISPCH, 2020.

4. Principios del Método EPA-8

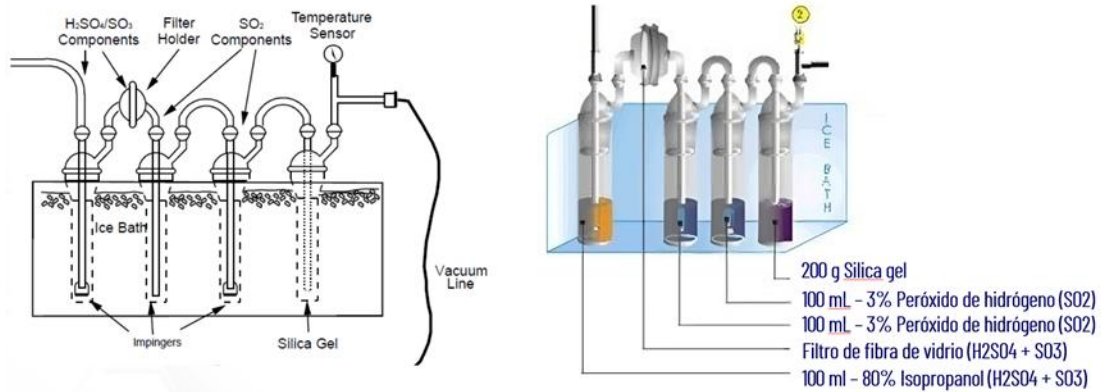
El método EPA-8 se fundamenta en la extracción de una muestra representativa de los gases de chimenea mediante un tren de muestreo, donde los contaminantes gaseosos se absorben en soluciones químicas específicas. Posteriormente, los analitos capturados se cuantifican mediante un análisis químico.

4.1. Captura de los Contaminantes

Los gases de combustión se extraen isocinéticamente y se hacen pasar por una serie de impingers (recipientes de vidrio con soluciones absorbentes) diseñados para capturar SO_2 y $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SO}_3$:

- SO_2 se absorbe en una solución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 3%), donde se oxida para formar sulfato (SO_4^{2-}).
- La niebla ácida (H_2SO_4 y SO_3) se captura en una solución de isopropanol al 80%, evitando su transformación en SO_2 durante el muestreo.
- Se utiliza sílice gel para eliminar el exceso de humedad de la muestra.

Ilustración 4: Serie Impinger para la captura de SO₂



Fuente: Method 8: Determination of sulfuric acid and sulfur dioxide emissions from stationary sources, EPA, 2019

4.2. Análisis Químico de la Muestra

Una vez finalizado el muestreo, los impingers se trasladan al laboratorio, donde el contenido se analiza mediante titulación con bario-torio, permitiendo determinar la concentración de SO₂ y niebla de ácido sulfúrico.

Ilustración 5: Análisis Químico de la Muestra



Fuente: Laboratorio Kipus

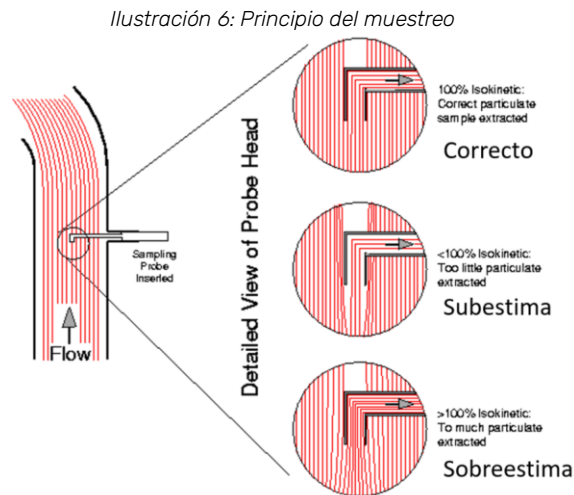
4.3. Importancia del Muestreo Isocinético

El método EPA-8 requiere que el muestreo se realice isocinéticamente, es decir, que la velocidad del gas dentro de la sonda de muestreo sea igual a la velocidad del gas en la chimenea. Esto evita errores en la medición y garantiza que la cantidad de contaminantes recolectados sea representativa de la corriente de gases.

Para lograr el muestreo isocinético, es imprescindible conocer con precisión el caudal del gas en la chimenea, lo que se determina con el método CH-2.

Principios clave del isocineticismo:

- Si la velocidad de muestreo es demasiado baja, se subestiman las concentraciones.
- Si la velocidad es demasiado alta, se sobrestiman las emisiones.
- Se recomienda mantener el isocinetismo entre el 90% y 110% para garantizar mediciones precisas.



Fuente: Elaboración propia a partir de Method 5, California EPA: Air Resources Board, 1997

5. Métodos Complementarios de Medición

El método EPA-8 se basa en la captura química de los contaminantes en soluciones absorbentes específicas y su posterior análisis mediante técnicas de titulación química. Sin embargo, para una ejecución precisa y confiable, el método EPA-8 no puede aplicarse de manera aislada, sino que requiere la implementación de otros métodos complementarios que permiten determinar condiciones esenciales del muestreo, como el flujo de gases, la composición del gas de chimenea y su contenido de humedad.

- CH-1: Determina el punto óptimo de muestreo en la chimenea.
- CH-2: Calcula la velocidad y el caudal del gas, garantizando el muestreo isocinético.
- CH-3: Evalúa la composición del gas y determina su peso molecular seco.
- CH-4: Cuantifica la humedad del gas para corregir las concentraciones medidas.
- EPA-8: Captura SO_2 y $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SO}_3$ para su análisis químico.

A continuación, se detallan los principios del método EPA-8 y su interdependencia con los métodos CH-1, CH-2, CH-3 y CH-4.

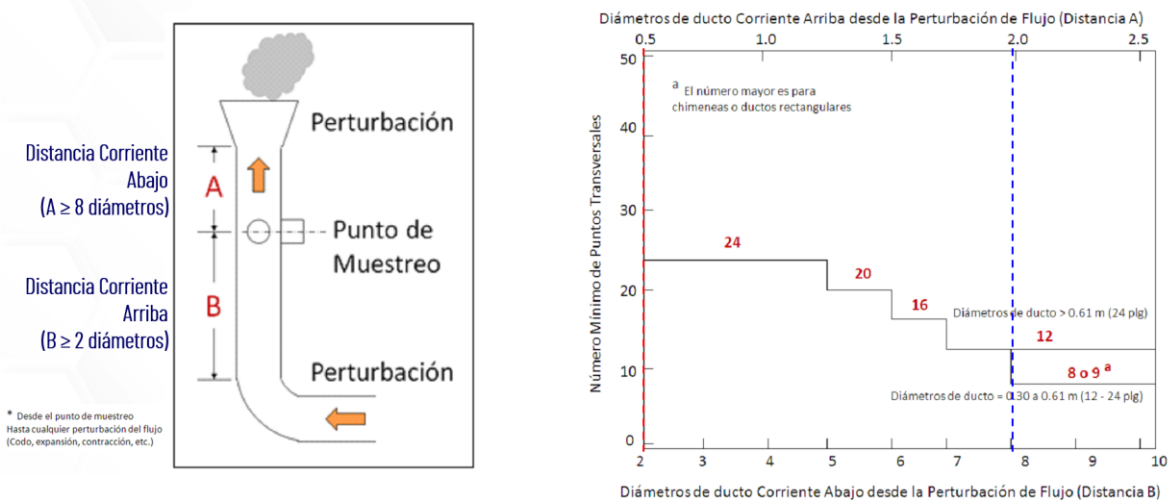
5.1. CH-1: Localización de Puntos de Muestreo

El método CH-1 establece las ubicaciones óptimas dentro de la chimenea para realizar la medición de contaminantes.

- Se deben respetar las distancias de corriente arriba y corriente abajo para evitar la interferencia de turbulencias.
- Se busca una zona con flujo laminar, es decir, sin movimientos irregulares del gas que puedan afectar la representatividad de la muestra.
- Se verifica la ausencia de flujo ciclónico mediante un inclinómetro, asegurando que el gas fluye de manera estable en la zona de muestreo.

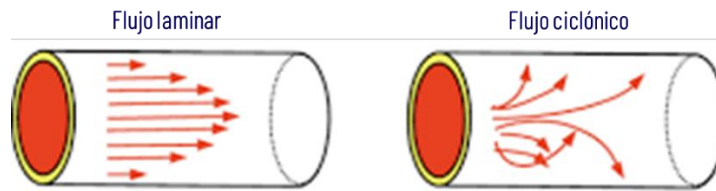
Este paso es fundamental, ya que una mala ubicación del punto de muestreo puede comprometer la precisión de los datos obtenidos.

Ilustración 7: Método CH-1 de la localización de Puntos de Muestreo



Fuente: Laboratorio Kipus

Ilustración 8: Flujo laminar



Fuente: Validation Studies of Symmetry BC vs Wedge BC, 2023.

Ilustración 9: inclinómetro



Fuente: Laboratorio Kipus

5.2. CH-2: Medición de Velocidad y Caudal de Gases

El método CH-2 se emplea para medir la velocidad y el flujo volumétrico de los gases de chimenea, parámetros fundamentales para garantizar el muestreo isocinético en EPA-8.

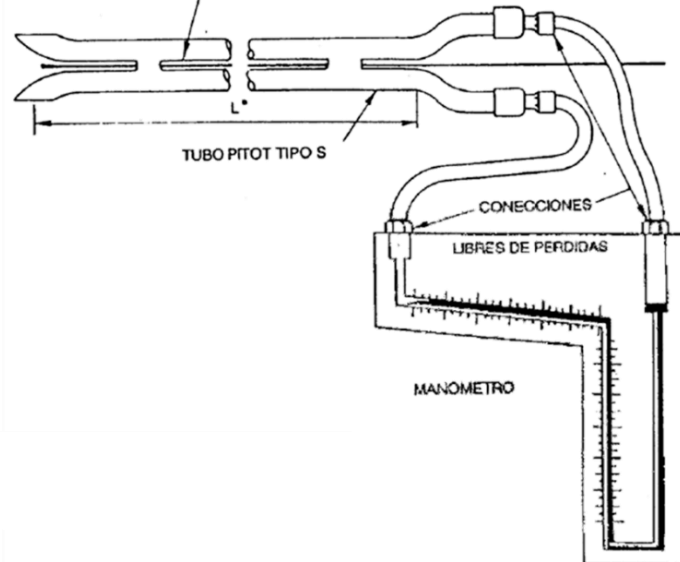
- Se usa un tubo Pitot Tipo S, que permite determinar la velocidad del gas a partir de la diferencia entre presión dinámica y presión estática.
- Se registra la presión diferencial utilizando un manómetro inclinado o un dispositivo equivalente.
- A partir de la velocidad del gas, se calcula el caudal volumétrico, lo que permite determinar el flujo de muestreo adecuado para que la extracción de gases sea representativa.

Ilustración 10: Instrumentos de medición de velocidad



Fuente: Laboratorio Kipus

Ilustración 11: Método CH-2 de la medición de velocidad y caudal de gases



Fuente: Método CH-2, ISPCH, 1996

5.3. CH-3: Análisis de Gases y Peso Molecular Seco

El método CH-3 permite determinar la composición química del gas de chimenea, proporcionando información sobre la concentración de O_2 , CO_2 y CO en los gases emitidos, permitiendo evaluar el exceso de aire en la combustión y corregir la velocidad de emisión.

- Se utiliza un analizador electroquímico (Testo, ORSAT) para realizar al menos tres mediciones con el analizador y una con ORSAT.
- Con estos datos, se obtiene el peso molecular seco del gas, el cual es crucial para corregir los cálculos de velocidad y caudal del gas en la chimenea.

Este método permite evaluar el exceso de aire en la combustión, lo que es útil para identificar problemas en la eficiencia del proceso y la generación de contaminantes.

Ilustración 12: Dispositivos de medición para determinar la concentración de O₂, CO₂ y CO



Fuente: Laboratorio Kipus

5.4. CH-4: Determinación de Humedad en Gases de Chimenea

El método CH-4 se emplea para cuantificar la humedad en los gases de chimenea, lo que es fundamental para calcular la concentración real de SO₂.

- Se extrae una muestra de gas y se mide la cantidad de agua contenida en ella.
- La humedad afecta la dilución del SO₂, por lo que su determinación es clave para reportar resultados en base seca o base húmeda, según lo requieran las normativas ambientales.

Ilustración 13: Impinger para determinar la humedad de los gases



Fuente: Environmental Supply Company

5.5. EPA-8: Determinación de Emisiones de SO₂ y Ácido Sulfúrico

Este método se basa en la captura de SO₂ en soluciones de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y la medición por titulación con bario-torio. Se recomienda verificar los reactivos empleados en el análisis para garantizar la precisión de los resultados.

6. Conclusión

La medición de emisiones de SO_2 es un proceso clave para el cumplimiento de normativas ambientales y la reducción del impacto de la contaminación atmosférica. A través de métodos normalizados como CH-5 y EPA-8, se puede determinar con precisión la concentración de SO_2 y su contribución a la degradación de la calidad del aire.

Los avances tecnológicos y la implementación de Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) han permitido establecer límites más estrictos para la emisión de SO_2 , exigiendo a las industrias adoptar mediciones regulares y tecnologías de control. Sin embargo, la ausencia de estaciones oficiales de monitoreo en algunas regiones sigue siendo un desafío para garantizar la efectividad de estas regulaciones.

La correcta aplicación de estos métodos es fundamental para la toma de decisiones en políticas ambientales y para la adopción de estrategias de mitigación que reduzcan la contaminación y protejan la salud de la población.