

Gestión de Calidad Ambiental

Módulo
Calidad del Aire

2024



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Contenido

- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

Contenido

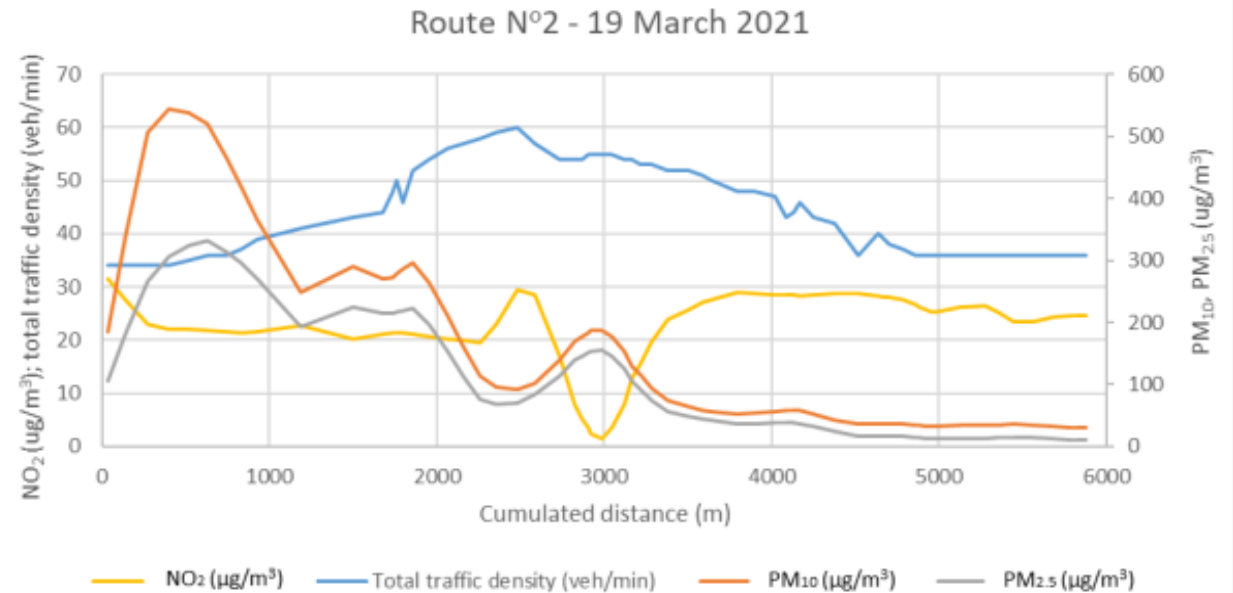
- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

- Medición en la inmisión:

- ❖ Concentraciones bajas

- ❖ Influencia de condiciones meteorológicas

- ❖ Comportamiento no estacionario



- Medición en la emisión:

- ❖ Contaminantes conocidos

- ❖ Concentraciones altas



- Unidades de concentración:

- ❖ Masa / Vol: mg/m^3 ; $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- ❖ Vol / Vol: ppm (mL/m^3)

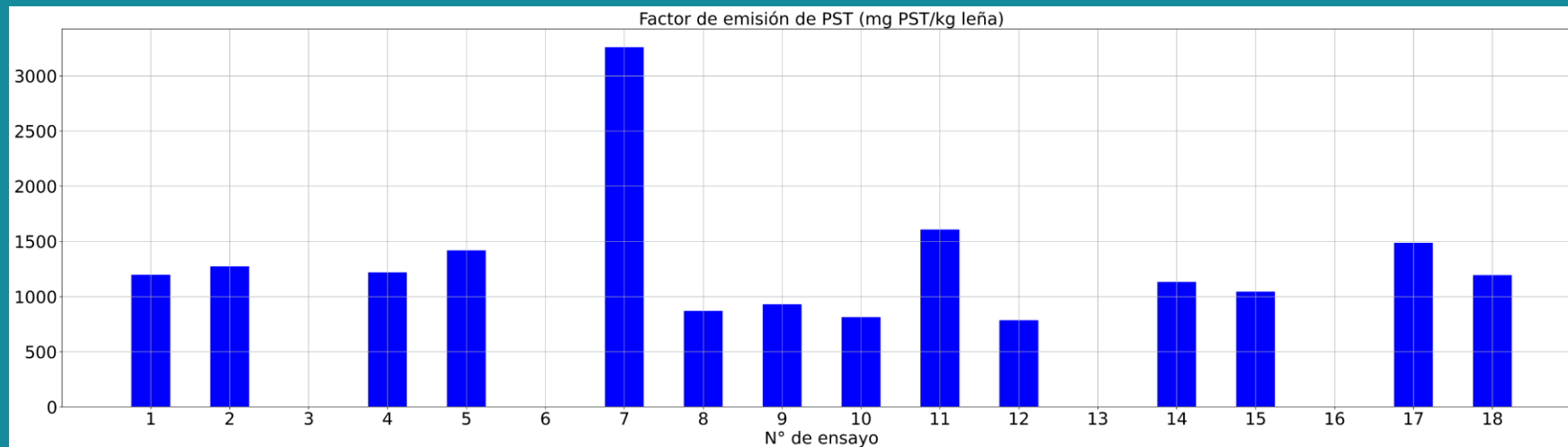
- Masa de contaminante: m
- Caudal de gases: Q
- Tiempo: t

$$C = \frac{m}{Q \cdot t}$$

- Condición del gas:

- ❖ $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 760 \text{ mmHg}$

- ❖ $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$; mg/Nm^3



- Para poder evaluar la presencia de contaminantes atmosféricos, lo primero que debemos hacer es obtener una muestra de aire
- Muestra: parte representativa de un todo (en términos espaciales y temporales)
- Sin un muestreo adecuado, las conclusiones derivadas de las mediciones pierden validez
- Para muestreos en emisión deben considerarse: ciclos de producción, funcionamiento de sistemas de limpieza
- Para muestreos en inmisión deben considerarse: entorno del sitio (fuentes emisoras, obstáculos), condiciones meteorológicas, concentración de base, funcionamiento del emprendimiento bajo análisis en caso de existir
- Deben tenerse en cuenta posibles errores introducidos por el método de medida

- Para evaluaciones en grandes áreas (barrios, ciudades) se debe definir el número de estaciones necesarias y su ubicación en función de diversos aspectos: densidad de población, meteorología, geografía, ubicación de fuentes emisoras, entre otros

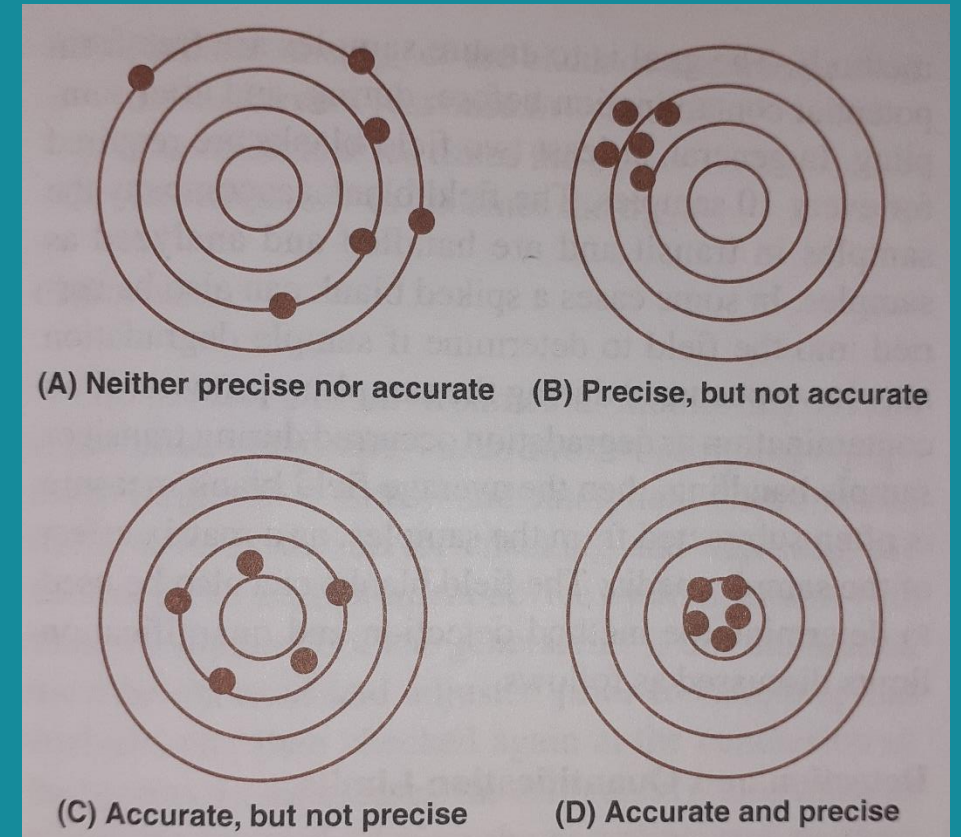


Contenido

- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Otras estaciones de monitoreo en Uruguay
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

Control y garantía de las mediciones

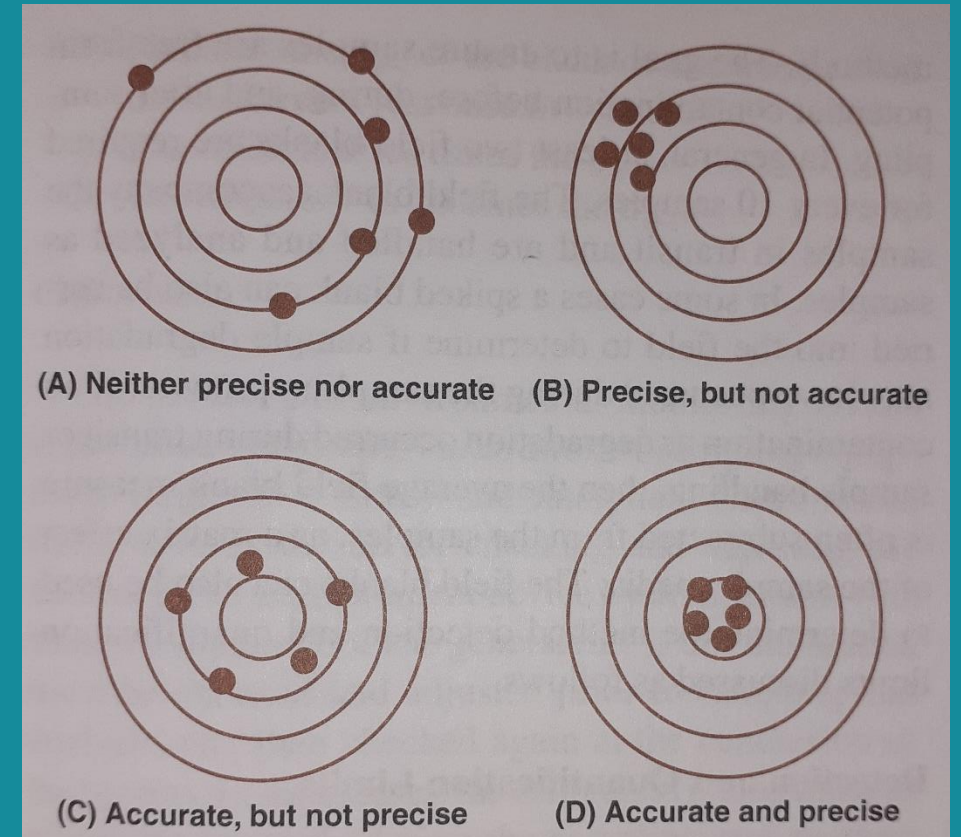
- Exactitud: cercanía con el valor real
- Precisión: reproducibilidad de los resultados
- Sensibilidad: capacidad de captar cambios pequeños de concentración
- Informes deben comunicar: registros por debajo del límite de detección del equipo, datos faltantes, etc.



R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013

Control y garantía de las mediciones

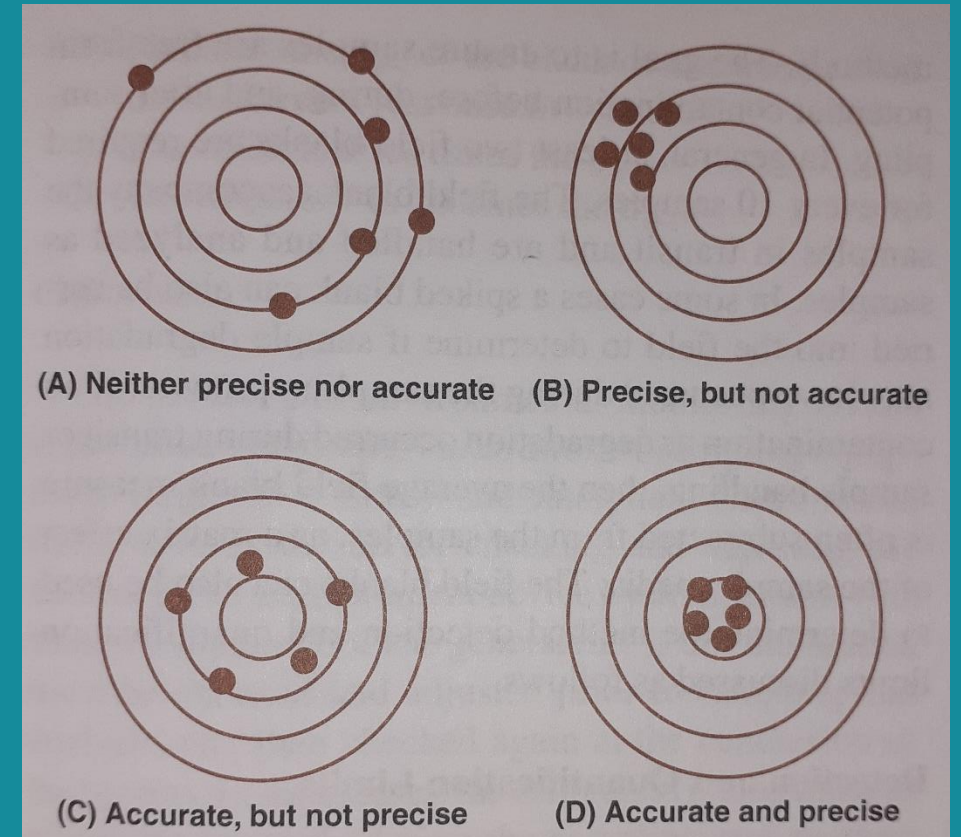
- La exactitud de los resultados de los monitoreos depende de la calibración de los equipos de medición utilizados (caudales, concentraciones)
- Esto implica la comparación de los registros de un equipo particular con aquellos proporcionados por un estándar conocido
- Luego, los registros del equipo bajo estudio se ajustan de forma tal de que se asemejen al estándar



R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013

Control y garantía de las mediciones

- Calibración Span: punto de calibración para monitores, en el cual se observa la respuesta del equipo a una concentración entre el 80 % y el 90 % de su rango de medición
- Calibración Cero: punto de calibración para monitores, en el cual se observa la respuesta del equipo a una muestra de aire puro, libre de contaminantes. A esta muestra de aire limpio o puro se le llama Aire Zero o Gas Zero



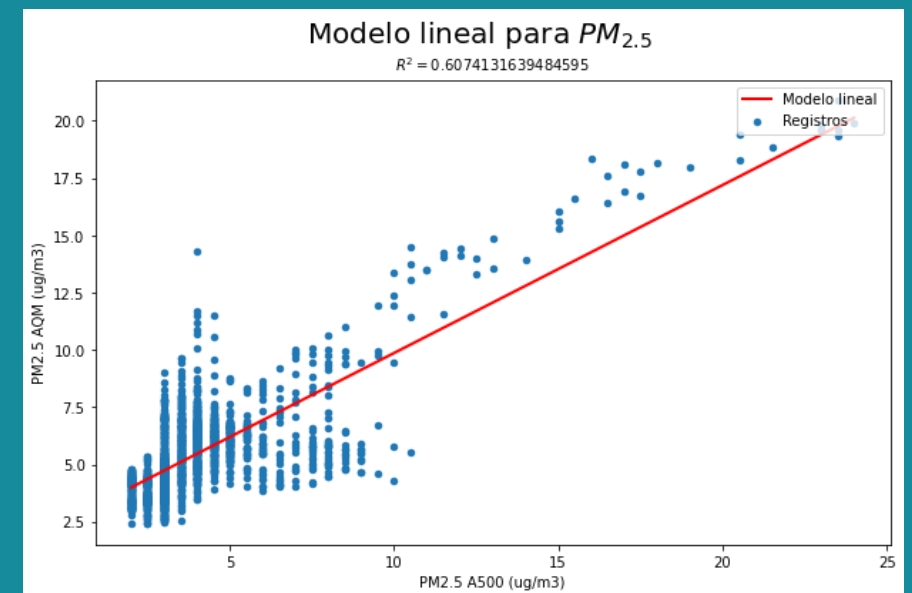
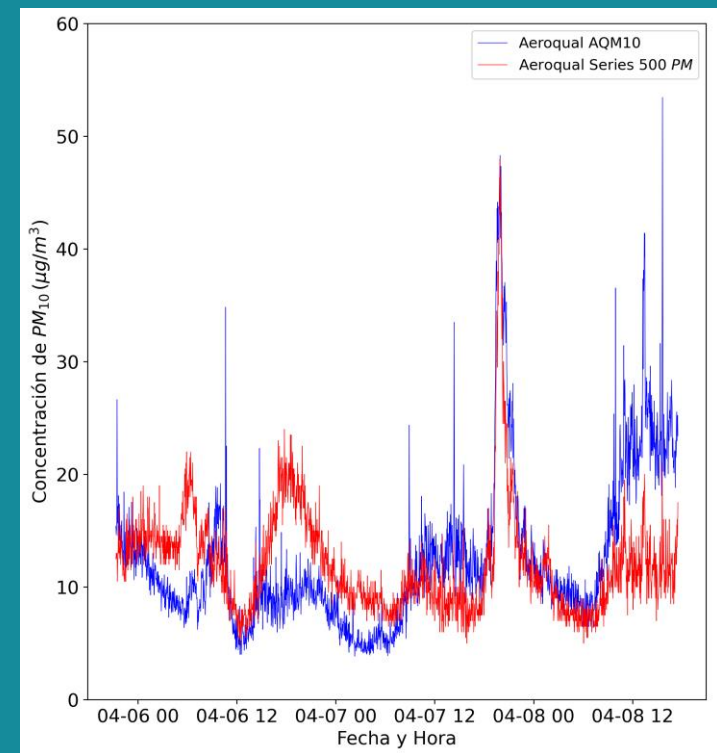
R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013

Control y garantía de las mediciones

- Ejemplo de una contrastación:



Proyecto CSIC-VUSP “Evaluación experimental de la exposición a contaminantes atmosféricos durante el transporte activo: aportes para su zonificación en Montevideo”



Control y garantía de las mediciones

- Ejemplo de una verificación:



Verificación de cero

Proyecto CSIC-Iniciación a la investigación “Evaluación de las causas detrás de los episodios de contaminación atmosférica por partículas en la ciudad de Montevideo”



Verificación de flujo

Métodos de muestreo y equipamiento

- La selección del equipo de muestreo y las técnicas de análisis deberán estar de acuerdo con los objetivos previamente fijados y la calidad de los datos requeridos
- También debe considerarse la capacidad económica local, la disponibilidad de personal capacitado, el costo y complejidad del instrumento, así como su confiabilidad y requerimientos de funcionamiento
- Los sistemas más caros proveen datos de alta calidad, pero son más complejos de manejar
- Se recomienda elegir la tecnología disponible más simple y barata que cumpla con los objetivos de monitoreo especificados

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Filtración: el aire se hace pasar a través de un filtro en el cual quedan retenidas las partículas:
- ❖ Análisis gravimétrico: se determina la masa de partículas recolectada (la concentración de partículas puede obtenerse dividiendo este valor entre el volumen de aire muestreado)
- ❖ Análisis químico: se determina la composición del material recolectado



Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Muestreo inercial: se diseñan con una velocidad del flujo, y un cambio en su dirección, de forma tal que se produzca el impacto inercial de la partícula de interés:
 - ❖ Este impacto puede darse en un filtro (en este caso el aire no pasa a través del filtro, sino que este se utiliza para recolectar las partículas que se desviaron del flujo de aire)
 - ❖ Este método también sirve para “eliminar” fracciones gruesas del flujo, y luego coleccionar en un filtro partículas “más chicas”
- Ciclones: se utiliza la fuerza centrífuga para provocar el movimiento de las partículas hacia una superficie colectora. Las partículas se coleccionan por impacto inercial

Métodos de muestreo y equipamiento

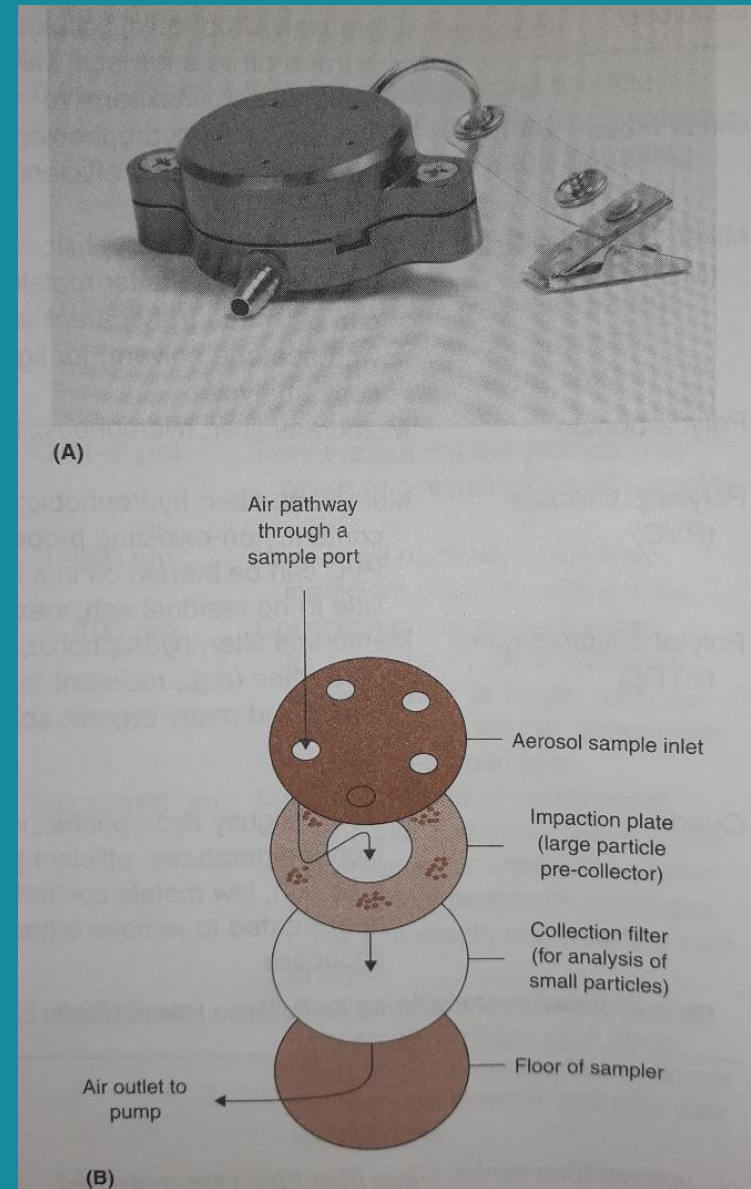
Partículas

- Medidores ópticos: brindan la posibilidad de obtener concentraciones de partículas en tiempo real (sin la necesidad del análisis gravimétrico de un filtro). En estos dispositivos, el aire pasa por una cámara iluminada, donde las partículas dispersan la luz que reciben. La intensidad de la luz desviada (Nefelómetros) o absorbida (Aetalómetros) se vincula a la concentración de partículas:
- ❖ Pueden utilizarse con algún dispositivo de impacto inercial previo, de forma tal de obtener la concentración de una fracción de partículas específica
- ❖ El uso de esta metodología exige una calibración con mediciones gravimétricas simultáneas (referencia)

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Dispositivo de muestreo de PM_{10} por impacto inercial y filtración:
- ❖ Las partículas “grandes” son desviadas del flujo por impacto inercial
- ❖ Las partículas PM_{10} quedan retenidas en el filtro



R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Dispositivo de muestreo de PM_{10} de alto volumen por impacto inercial y filtración:
 - ❖ Las partículas “grandes” son desviadas del flujo por impacto inercial
 - ❖ Las partículas PM_{10} quedan retenidas en el filtro
 - ❖ El muestreo se lleva a cabo de manera continua durante 24 horas
 - ❖ El filtro sin muestra tiene que ser previamente acondicionado a las mismas condiciones de temperatura y humedad a las que se acondicionará ya con la muestra, después de haber sido expuesto

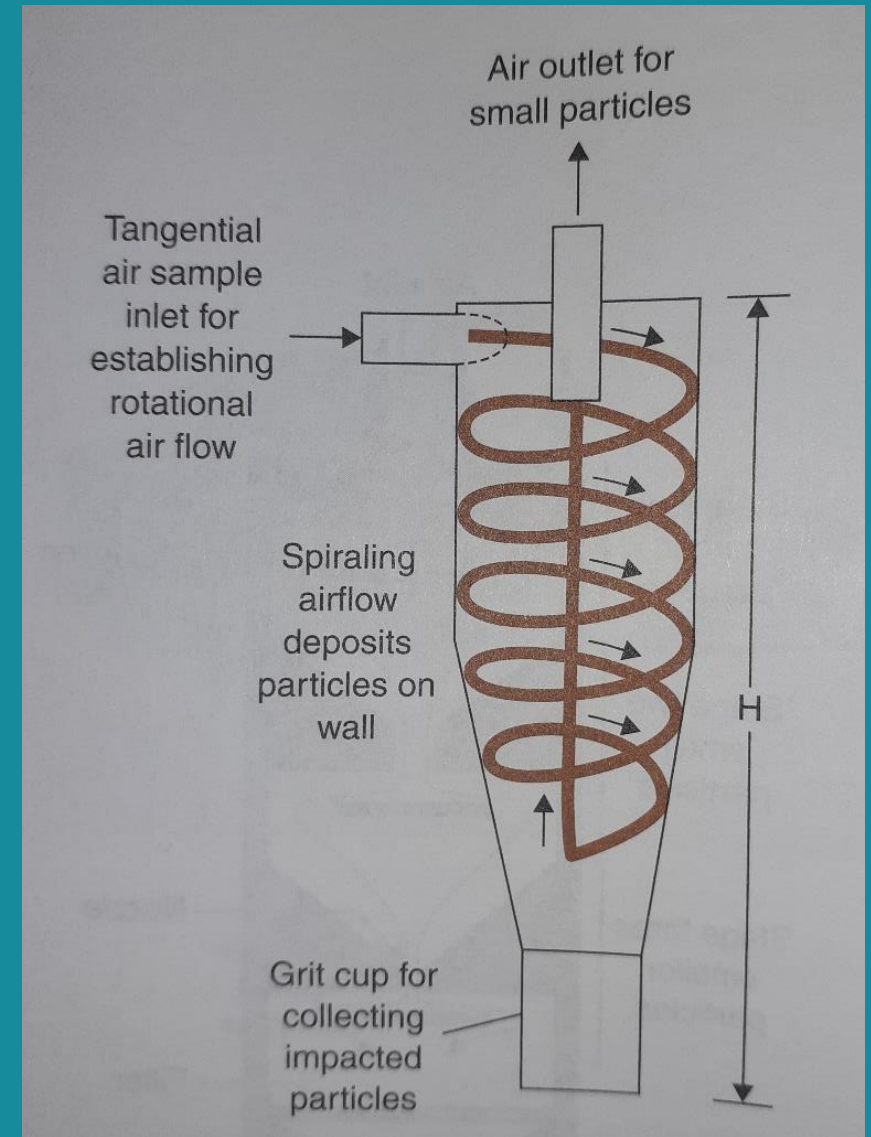


Equipo Hi-Vol configurado para PM_{10} (IM)

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Ciclón para selección de partículas a recolectar:
- ❖ Las partículas “grandes” son desviadas del flujo por impacto inercial
- ❖ Las partículas “pequeñas” abandonan la unidad por la parte superior para muestreo posterior

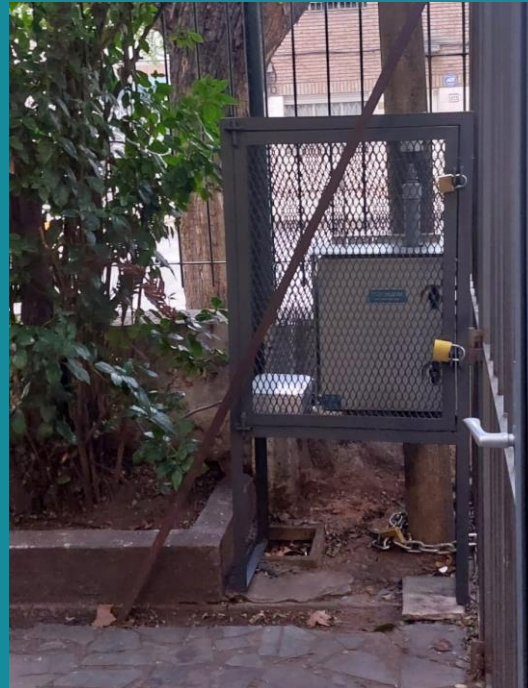


R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Medidores ópticos:
 - ❖ Existen equipos fijos y portátiles
 - ❖ Permiten la realización de mediciones continuas



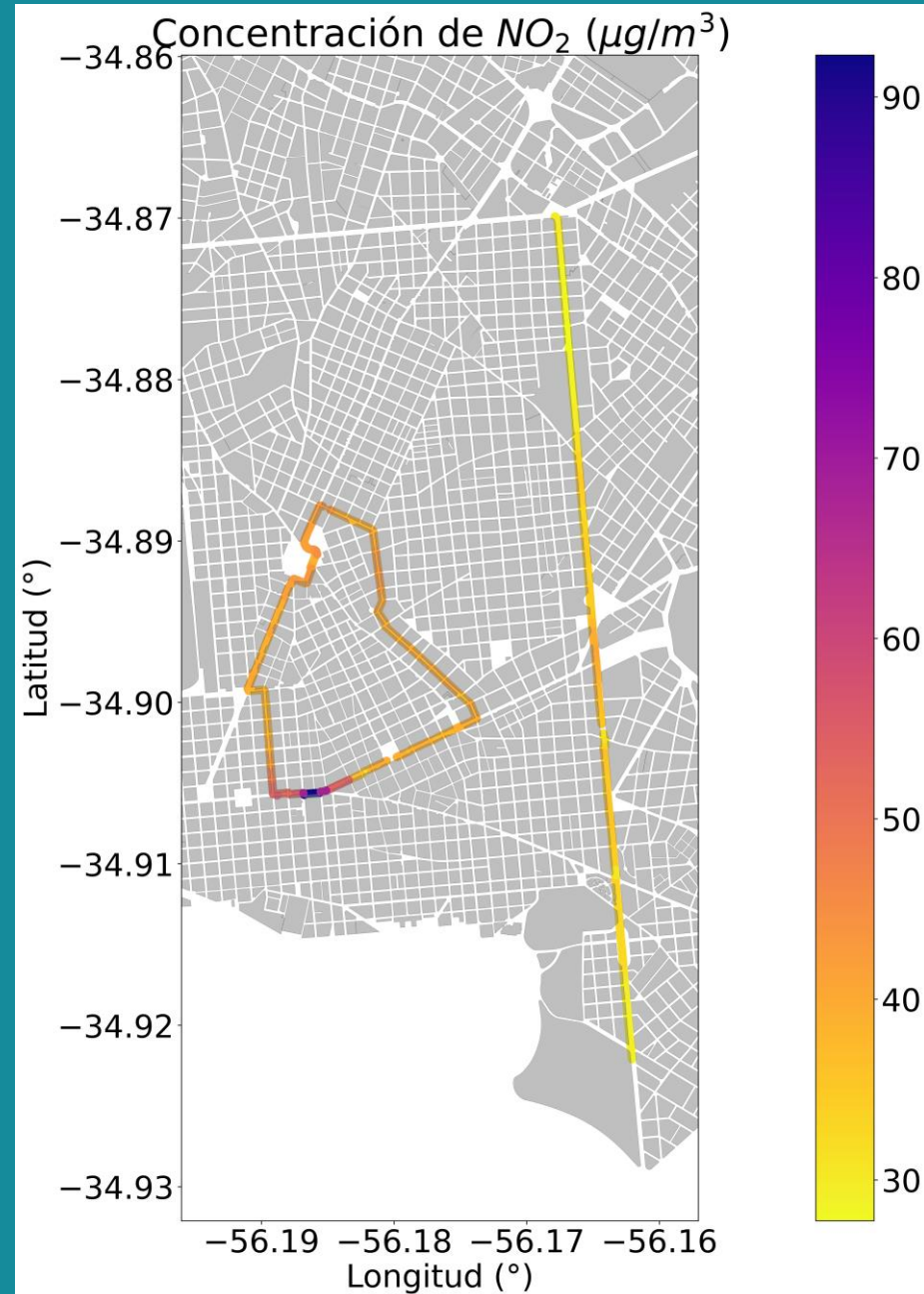
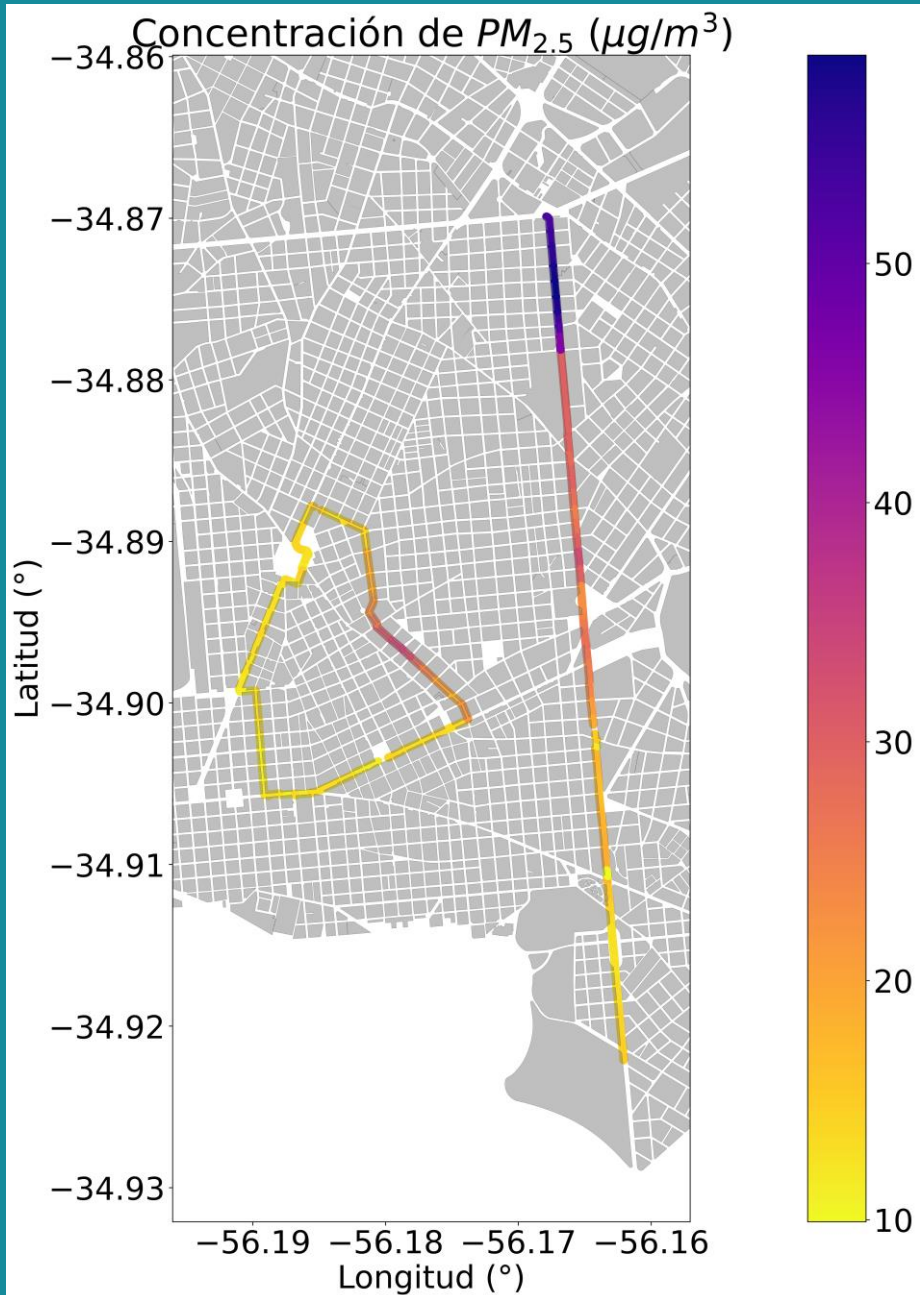
Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

- Medidores ópticos:
 - ❖ Utilizan la fotometría como principio de medición
 - ❖ Deben calibrarse con mediciones gravimétricas simultáneas (ejemplo de factor de corrección del medidor óptico: 1,263 para PM_{10} , de acuerdo con los resultados de un monitoreo del IMFIA)
 - ❖ Algunos equipos pueden registrar también algunos parámetros meteorológicos en paralelo



Monitoreo de calidad del aire en el barrio La Teja de Montevideo (ANII-FSE “Modelo integral de emisiones gaseosas y particuladas a la atmósfera: Análisis de una zona industrial y residencial de Montevideo”, IMFIA)

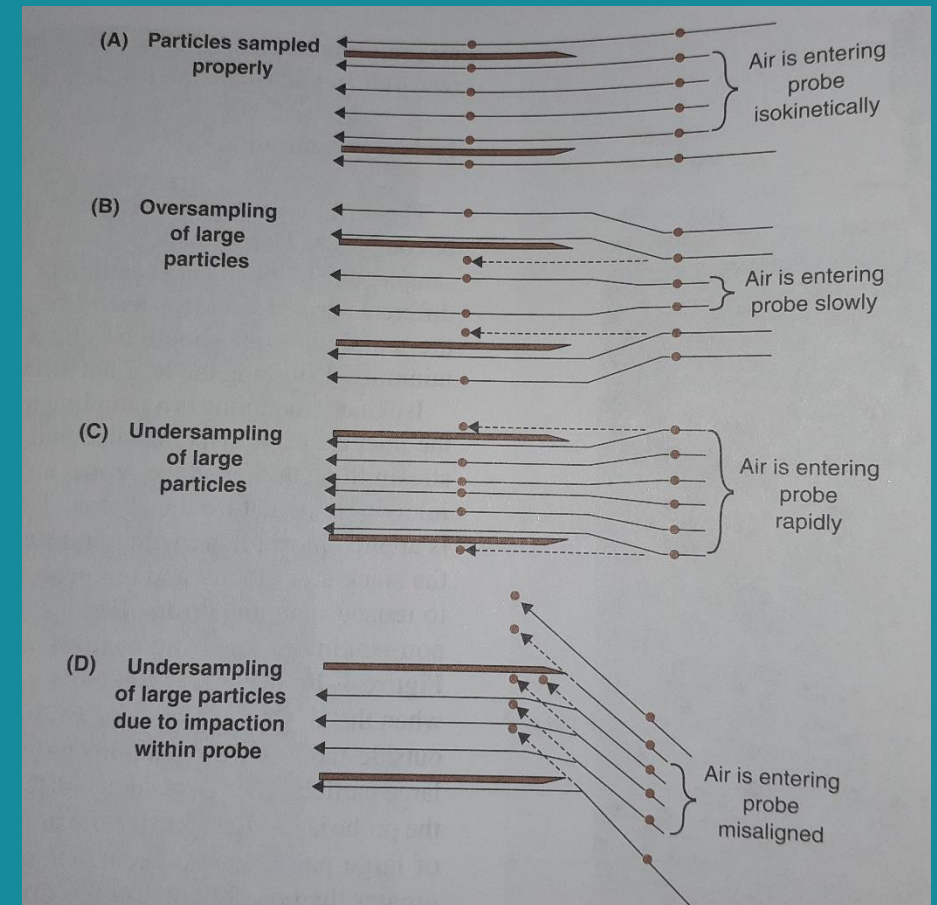


Proyecto CSIC-VUSP "Evaluación experimental de la exposición a contaminantes atmosféricos durante el transporte activo: aportes para su zonificación en Montevideo"

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas

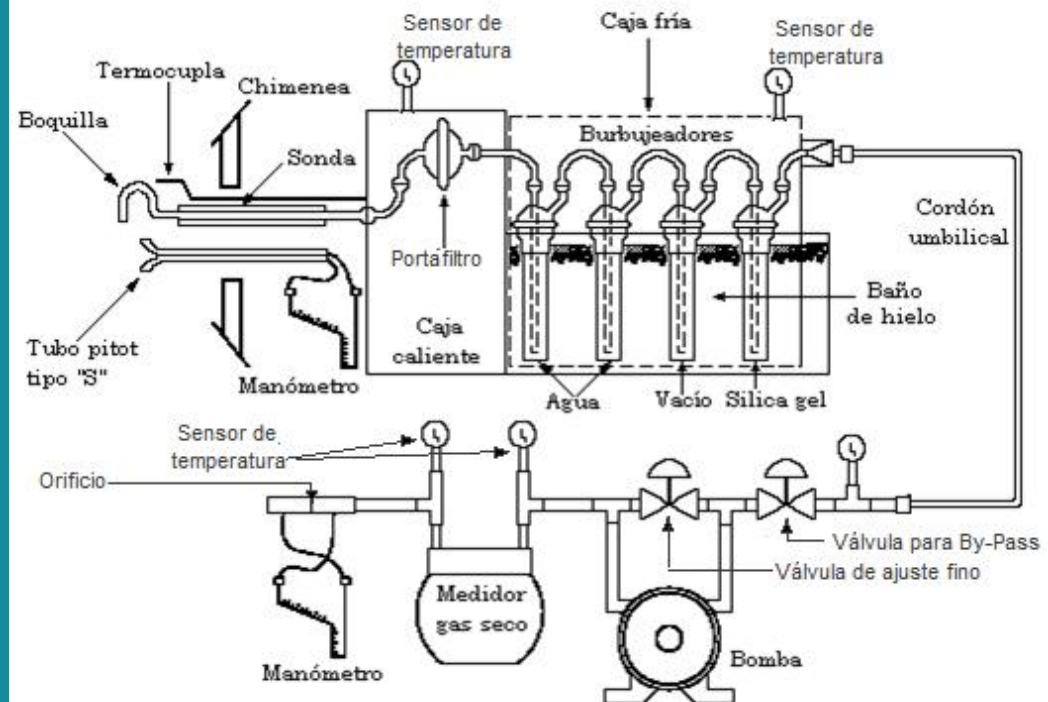
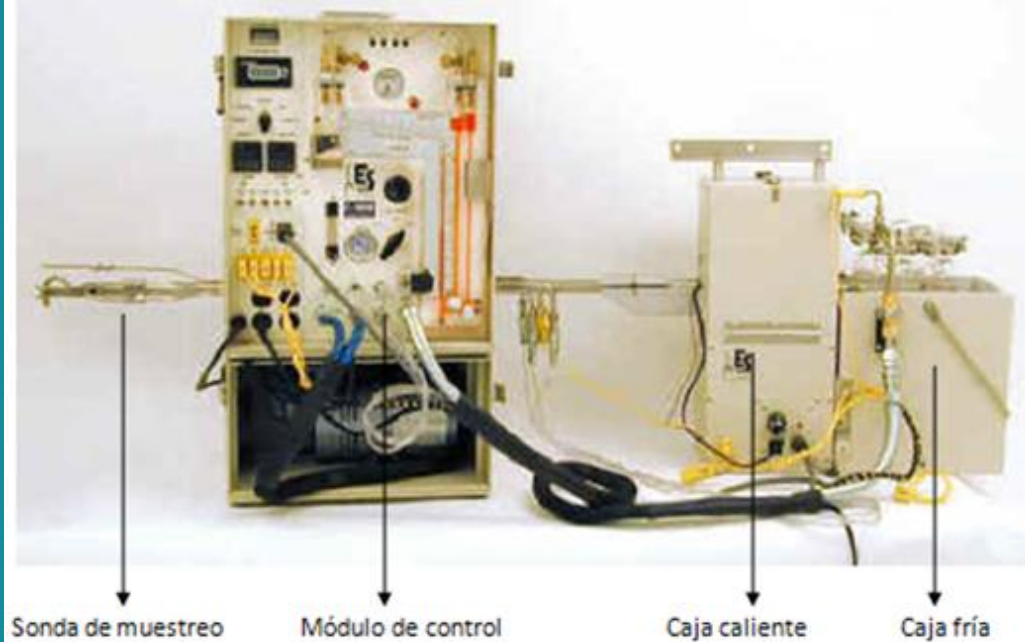
- Muestreo isocinético:
- ❖ Técnica de muestreo en la cual la velocidad de muestreo se iguala y se hace paralela al flujo de aire bajo análisis
- ❖ Además, en este tipo de muestreo, la toma del equipo no produce una perturbación significativa en el flujo de aire
- ❖ Se utiliza en general en el muestreo de emisiones de fuentes fijas



R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013

Métodos de muestreo y equipamiento

Partículas



Equipo de muestreo isocinético de emisiones de partículas (Método 5 de USEPA)

Métodos de muestreo y equipamiento

Gases



Ciclo 1

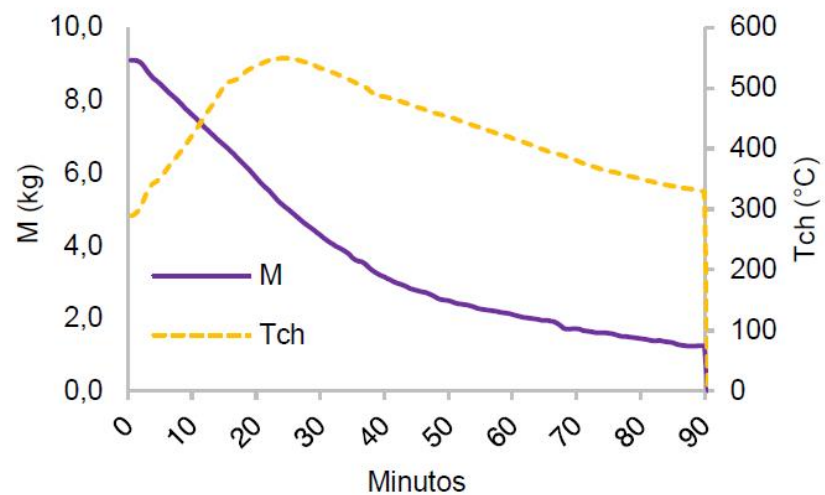
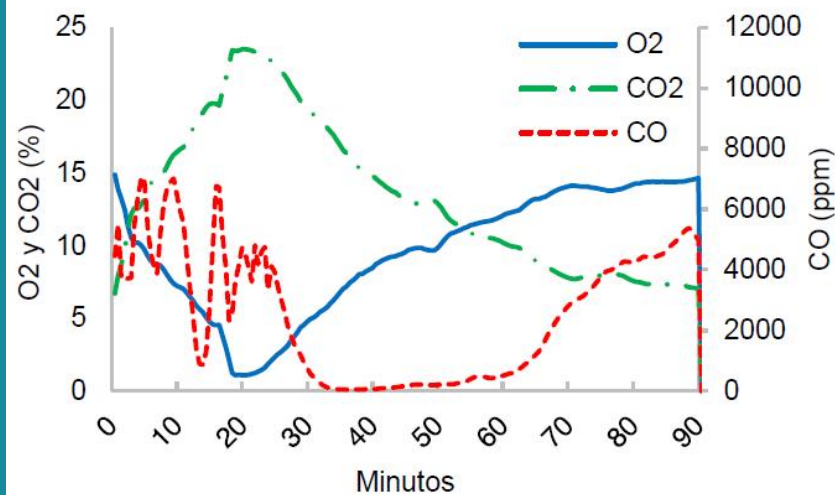


Ciclo 2

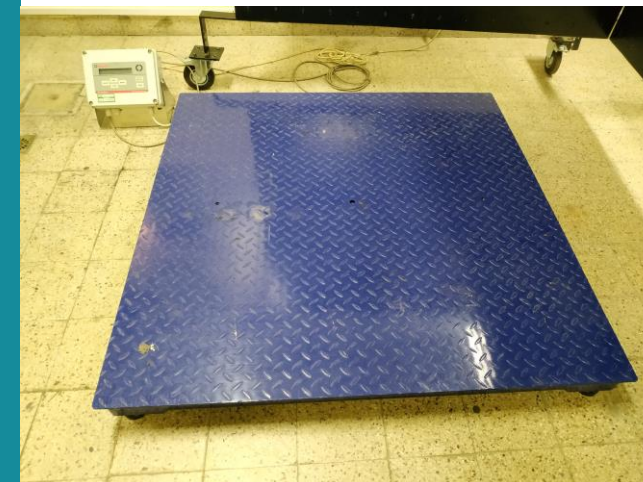


Ciclo 3

Ciclo 1



Analizador de gases marca Testo modelo 350



Balanza marca Secoin modelo 1212

Proyecto CSIC-VUSP "Evaluación de equipos de calefacción doméstica con fines de optimización del rendimiento energético y mejora de la calidad de aire interior y exterior"

Contenido

- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

- Compuesta por una o varias estaciones de monitoreo de la calidad del aire:
 - ❖ Estaciones manuales: se recogen muestras con cierta periodicidad, y luego se analizan en laboratorio para obtener valores de concentración de contaminantes
 - ❖ Estaciones automáticas: registro continuo de concentraciones de contaminantes a escalas temporales cortas



- Objetivos (implican distintas escalas espaciales y temporales de interés):

- ❖ Determinación de la distribución geográfica de la contaminación atmosférica
- ❖ Identificación de tendencias de contaminación atmosférica
- ❖ Seguimiento de la contaminación producida por determinada fuente de emisión particular
- ❖ Determinación del efecto de la contaminación atmosférica sobre la salud
- ❖ Evaluación del cumplimiento de estándares
- ❖ Apoyo a sistemas de alarma para la contaminación atmosférica (comunicación a la población)
- ❖ Validación de los resultados obtenidos en inventarios de emisiones y modelos de dispersión atmosférica de contaminantes
- ❖ Construcción de líneas de base

- Diseño:

- ❖ Según el ámbito geográfico de cobertura de las redes de monitoreo, estas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Urbana: su finalidad es conocer los niveles de contaminación en una zona urbana. Sus estaciones no deberán estar directamente influenciadas por fuentes locales como tráfico o industrias
- Tráfico: su finalidad es vigilar los niveles de contaminación atmosférica en una vía con tráfico considerable. Sus estaciones están directamente influenciadas por estas emisiones
- Industrial: sus estaciones se ubican en las proximidades de una implantación industrial, para el seguimiento de la contaminación atmosférica generada por la misma



- Diseño:

- ❖ Según el ámbito geográfico de cobertura de las redes de monitoreo, estas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Regional: sus estaciones se ubican lejos de zonas urbanas o suburbanas. Su objetivo es determinar la contaminación atmosférica de fondo a nivel regional

- De referencia: son estaciones ubicadas en zonas aisladas, preferentemente montañosas, donde no se prevean cambios en el uso del suelo en un radio del orden de 100 km. Se instalan para la medición y estudio de la contaminación atmosférica de fondo a nivel mundial



- Consideraciones para determinar el número de estaciones necesarias y su ubicación:

- ❖ Aspectos no-técnicos: accesibilidad del sitio

- ❖ Lugares que experimenten las concentraciones máximas de contaminantes atmosféricos

- ❖ Ejemplo de cálculo de representatividad espacial de una estación de monitoreo: *área donde los valores de concentración no difieren de los niveles medidos en la estación de monitoreo bajo estudio, por más de un valor umbral especificado (usualmente 20 % durante, al menos, el 90 % del tiempo). Esta representatividad se analiza a partir de la comparación entre las concentraciones registradas en la estación de monitoreo, y concentraciones medidas o modeladas en sus inmediaciones*

Aquí finaliza la clase

¿Preguntas?



Contenido

- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

- Su operación comenzó en el año 2004
- Aportes de estaciones de monitoreo de diferentes instituciones: Ministerio de Ambiente (MA), Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP) e Intendencia de Montevideo (IM)
- La IM se encarga de sistematizar la información obtenida por la Red, y de publicar los resultados con frecuencia semanal
- Contaminantes atmosféricos registrados en 2022: PM_{10} , PST, HN (carbono orgánico), SO_2 , $PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 , CO y TRS

Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

- Metodologías de medición utilizadas:
 - ❖ Monitores manuales de alto volumen para partículas
 - ❖ Medidores ópticos para partículas
 - ❖ Analizadores automáticos para gases:
 - CO: detección directa mediante espectroscopía infrarroja no dispersiva (el gas es irradiado con una fuente de energía infrarroja, la absorción de esta energía es proporcional a la concentración de CO)
 - NO₂: se mide por quimioluminiscencia (cantidad de luz generada por una reacción química) y con sensores de semiconductores sensibles al gas (menos precisos)



Equipo automático para la medición de la concentración de partículas y gases (IM)

Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

- Configuración:

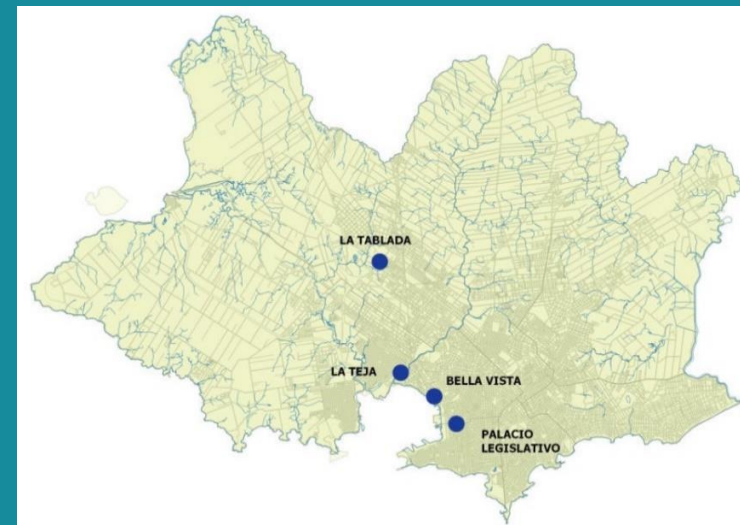
- ❖ Red Base



Nombre	Referencia	Dirección	PTS	PM10	PM2.5	TREN MONITOREO	NO2	O3	SO2
Ciudad Vieja	Academia Uruguay-AEBU	Rincón, Camacúa			X	X			
Tres Cruces	Terminal Tres Cruces	Br Artigas y V Haedo		X		X	X		
Curva de Maroñas	Municipio G	8 de Octubre y M Sastre		X	X	X	X	X	
Portones de Carrasco	Policlínica Lugo	Av Italia y Av Bolivia		X		X			
Colón	Terminal MTOP	Garzón y Cno Colman	X		X		X	X	
Barradas	Barradas	Barradas y Av Italia			X				X

Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

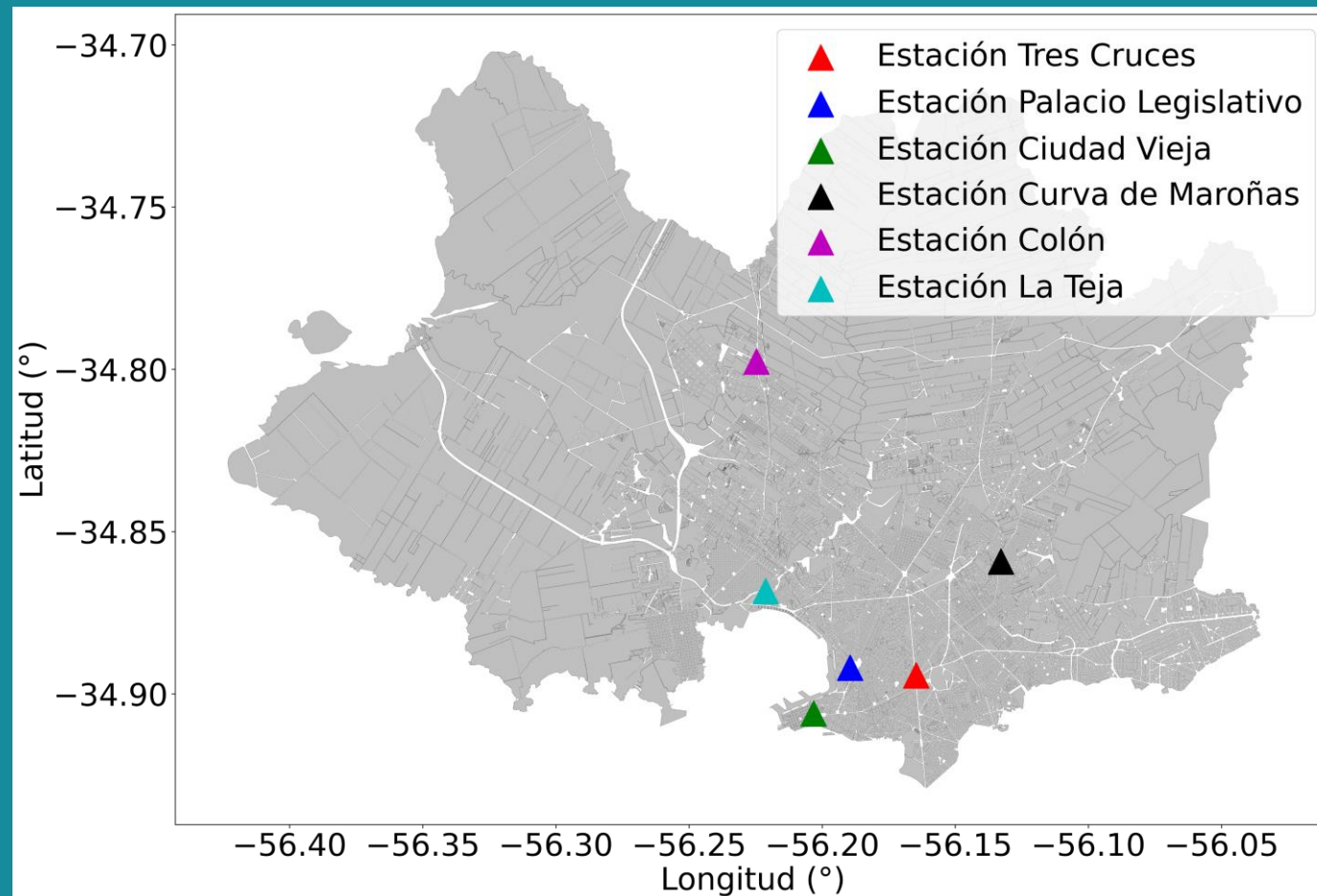
- Configuración:
 - ❖ Red Orientada a fuentes significativas



Nombre	Propietario	Dirección	PM10	PM2.5	SO ₂	NO ₂	CO	TRS	PARAMETROS METEOROLOGICOS
La Teja	ANCAP	Del Cid y Yañez Pinzón		X	X	X	X	X	X
Palacio Legislativo	UTE	Guatemala y Acuña de Figueroa	X		X	X	X		
La Tablada	UTE	Teófilo Días y Máximo Santos	X		X	X	X		X
Bella Vista	UTE	Rio Grande y Dionisio Carbajal	X		X	X	X		X

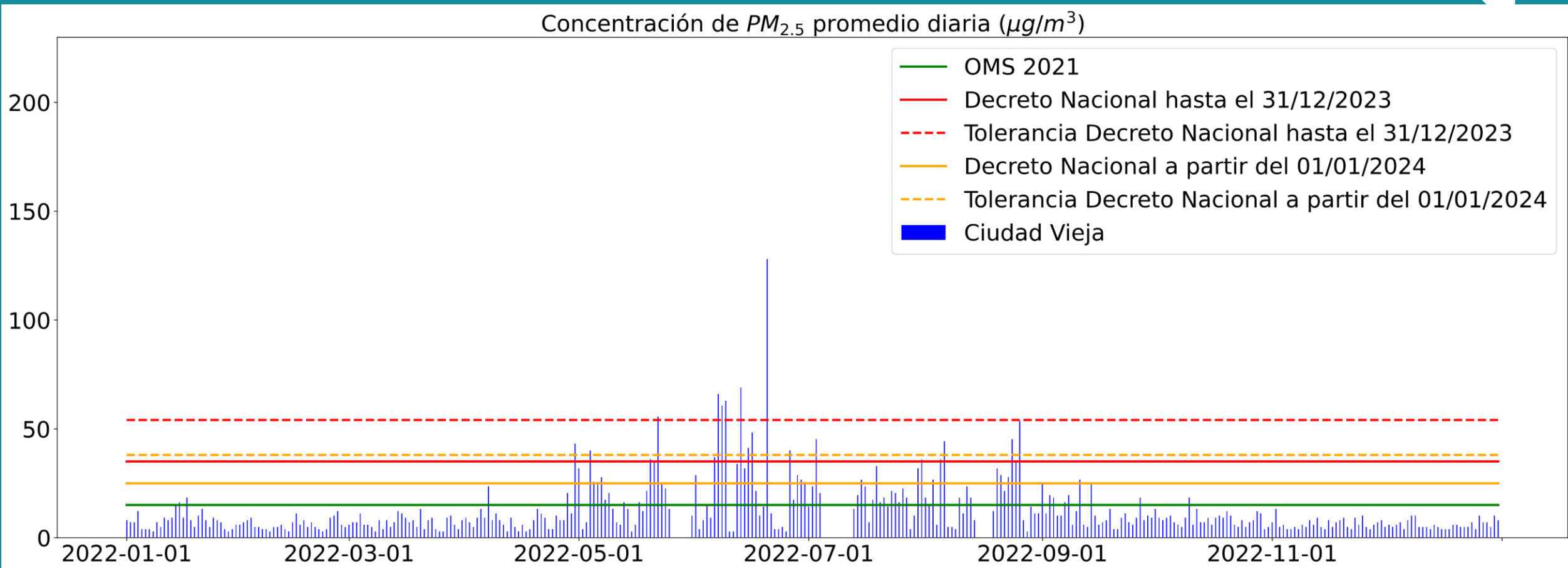
Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

- Algunos resultados de 2022:



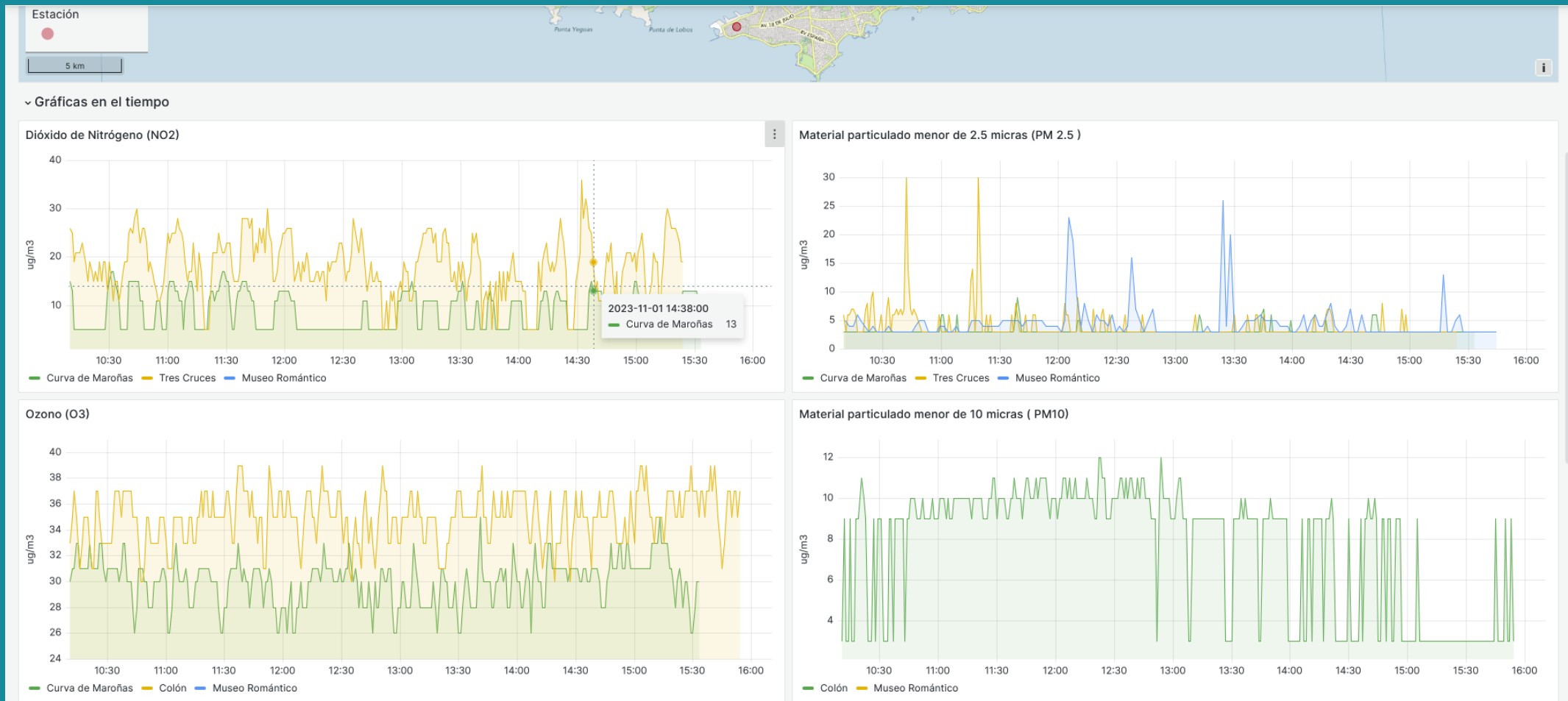
Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

- Algunos resultados de 2022:

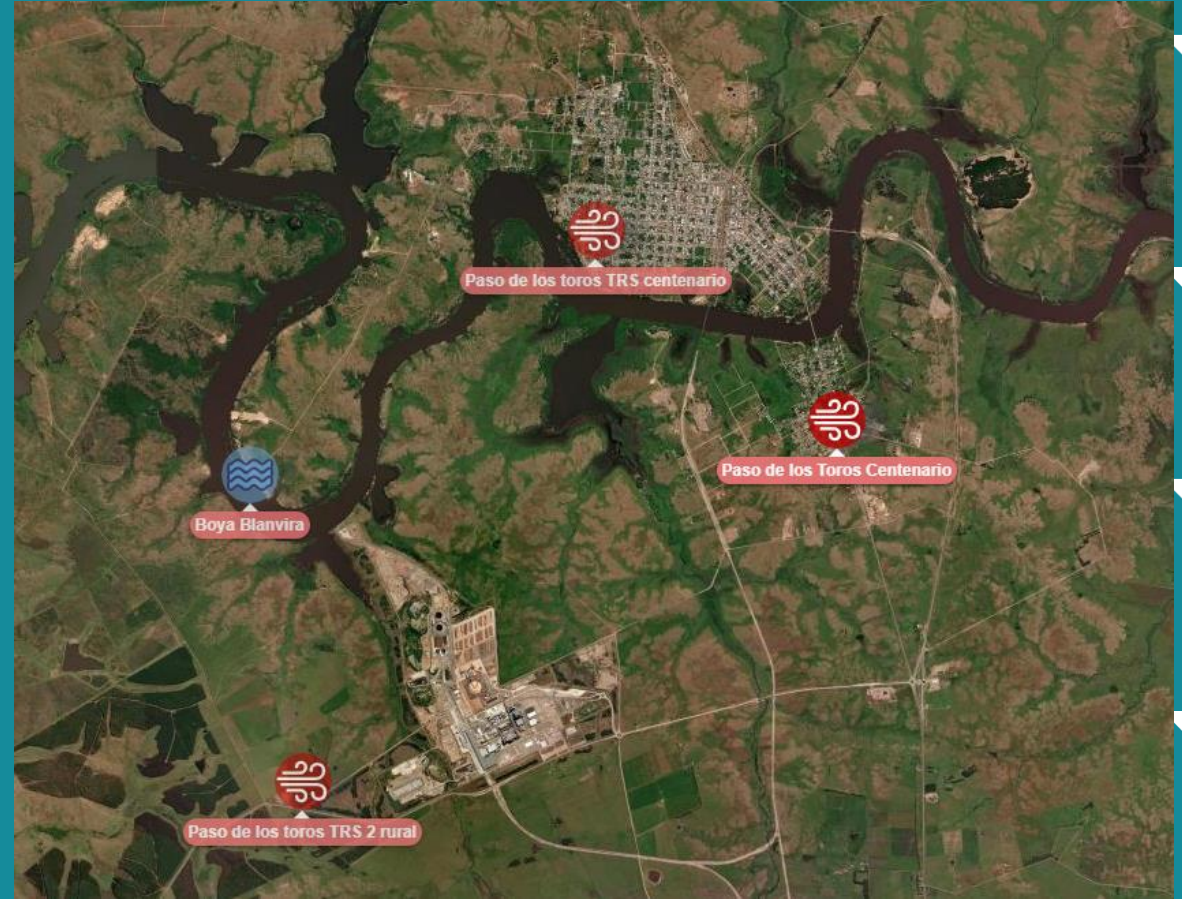


Red de monitoreo de la calidad del aire de Montevideo

- Datos abiertos: <https://graf.montevideo.gub.uy/graf/?orgId=2>



Otras estaciones de monitoreo (<https://www.ambiente.gub.uy/datos-tiempo-real/>)



Contenido

- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

Conversión de unidades de medida

- Para los gases, la concentración en ppm se puede convertir a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por medio de la siguiente expresión:

$$C \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{10^3 * C(\text{ppm}) * PM}{V_{\text{mol}}}$$

- ❖ PM: peso molecular del gas (g/mol)
- ❖ V_{mol} : volumen ocupado por un mol del gas (L/mol). En condiciones normales (0 °C y 1 atm), V_{mol} vale 22,4 L/mol para cualquier gas

Conversión de unidades de medida

- Con el objetivo de evaluar el cumplimiento de estándares de calidad del aire, en ocasiones las concentraciones de contaminantes registradas deben expresarse en condiciones normales (1013,25 hPa y 273 K) o en otras condiciones específicas de presión y temperatura:

$$C_2 = C_1 * \frac{T_1 * p_2}{T_2 * p_1}$$

- ❖ C_1 , T_1 y p_1 : concentración, temperatura y presión registradas
- ❖ C_2 : concentración expresada a temperatura T_2 y presión p_2

Conversión de unidades de medida

- En ocasiones puede ser necesario expresar la concentración en base húmeda de un gas medido en base seca
- Ejemplo: se mide a la salida de un proceso el gas de combustión con un analizador portátil de gases de combustión que trabaja en base seca
- El analizador muestra en pantalla un valor de $O_2 = 3,5 \%$
- Mediante otro método, se seca 1 m^3 de ese gas de combustión (incluyendo el vapor de agua) y se determina que en ese metro cúbico había inicialmente $0,2 \text{ m}^3$ de vapor de H_2O
- El valor de O_2 en base húmeda se calcula de la siguiente manera:
- $O_2 (\%BH) = O_2 (\%BS) * (100\% - H_2O (\%BH)) / 100$
- Por otro lado: $H_2O (\%BH) = 100 * 0,2 \text{ m}^3 \text{ de } H_2O / 1 \text{ m}^3 = 20 \%$
- **Entonces: $O_2 (\%BH) = 2,8 \%$**

Conversión de unidades de medida

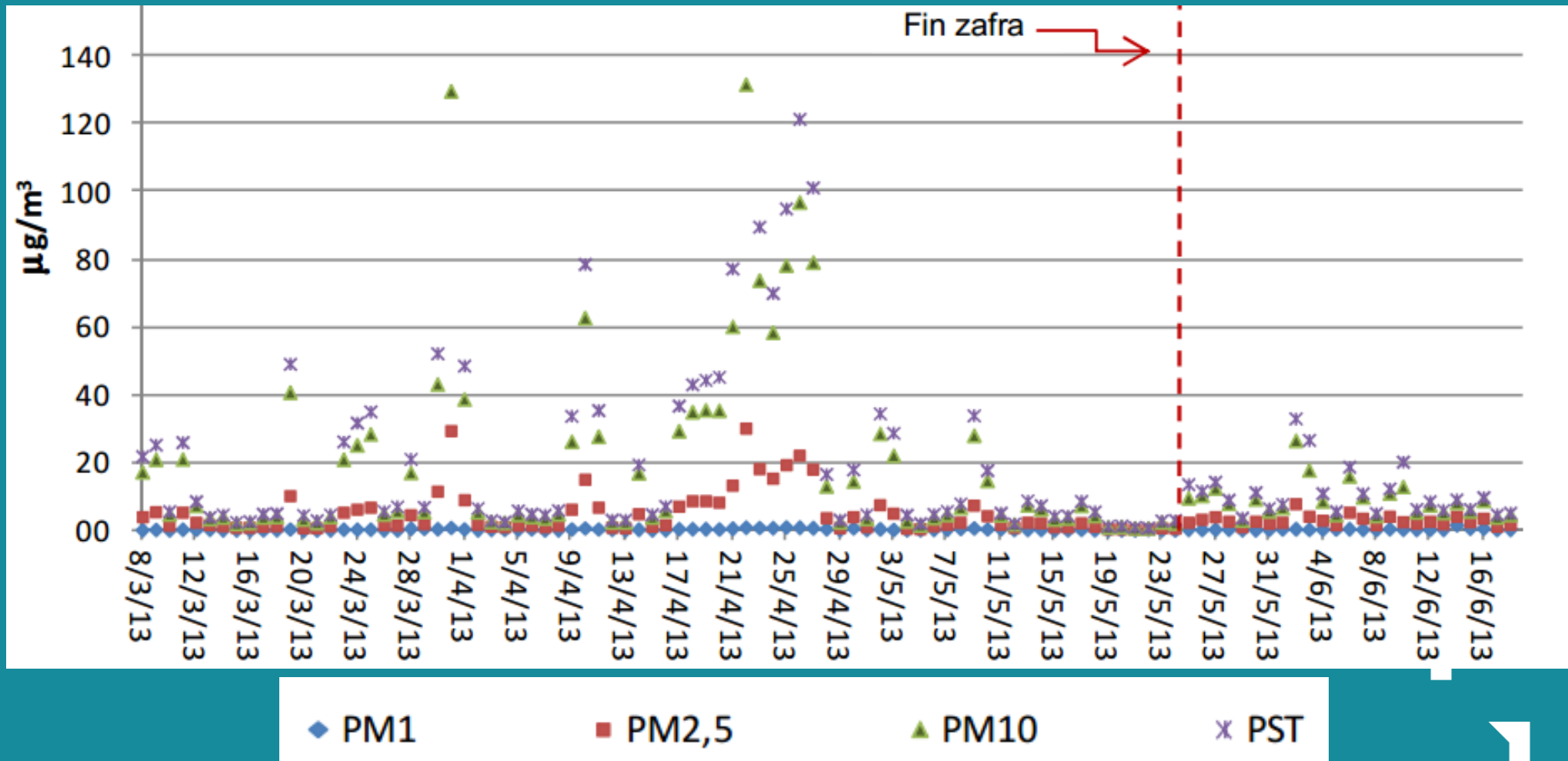
- Expresión de la concentración de contaminantes para diferentes porcentajes de oxígeno en el aire:

$$C_{y\%} = C_{x\%} * \frac{(21\% - y\%)}{(21\% - x\%)}$$



Análisis exploratorio

- Curvas de concentración diaria y horaria



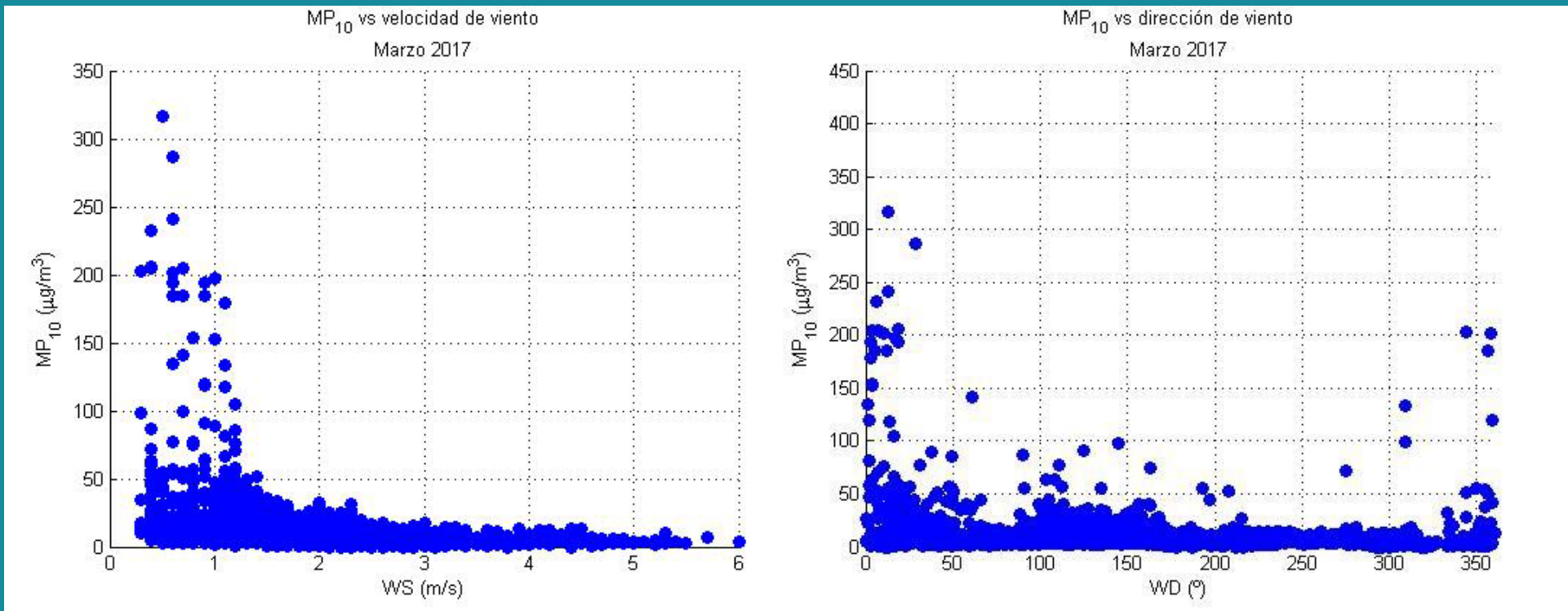
Análisis exploratorio

- Establecimiento de vínculos entre parámetros:
 - ❖ La vinculación entre los picos de concentración y la dirección del viento o la temperatura del aire puede ayudar a identificar fuentes emisoras de interés
 - ❖ Requiere del registro simultáneo de los parámetros a analizar



Análisis exploratorio

- Establecimiento de vínculos entre parámetros:



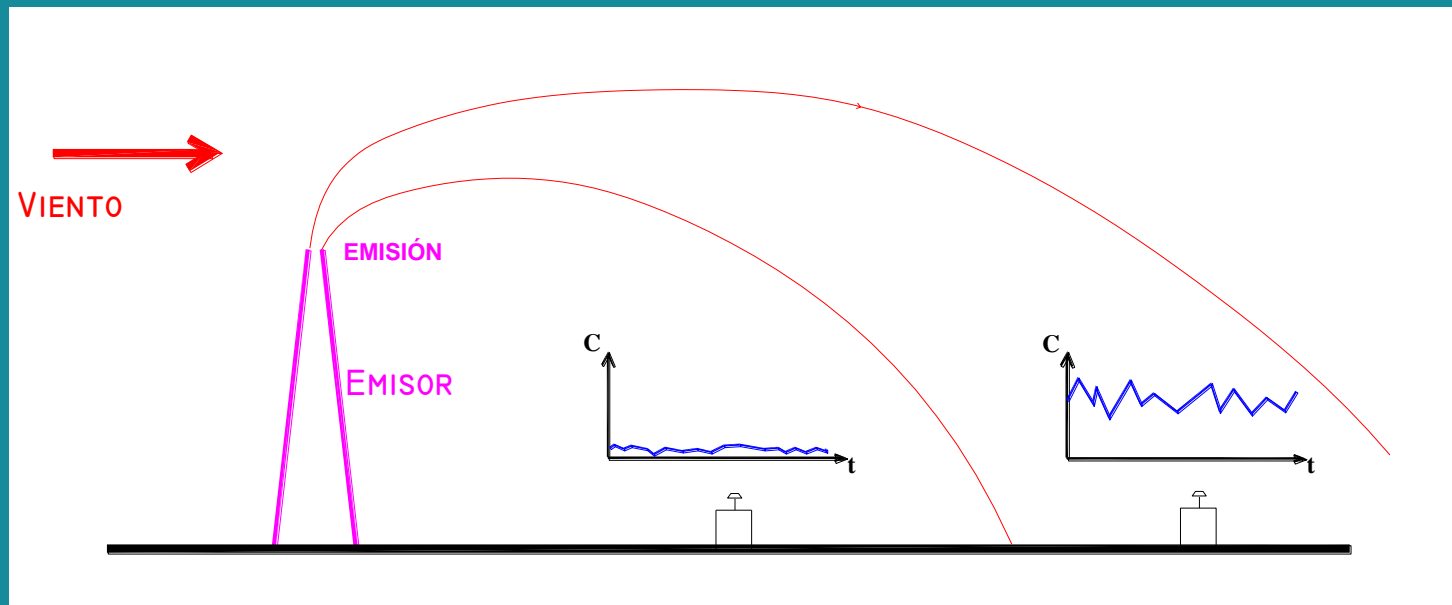
Monitoreo de calidad del aire en el barrio La Teja de Montevideo (ANII-FSE "Modelo integral de emisiones gaseosas y particuladas a la atmósfera: Análisis de una zona industrial y residencial de Montevideo", IMFIA)

Análisis exploratorio

- Establecimiento de vínculos entre parámetros:
 - ❖ Con el fin de obtener conclusiones de mayor peso, las relaciones evidenciadas en las figuras anteriores pueden evaluarse matemáticamente
 - ❖ Una posible forma de llevar a cabo esta tarea es a través del cálculo de coeficientes de correlación. A modo de ejemplo, el coeficiente de correlación de Spearman entre los valores de concentración de PM_{10} y velocidad del viento de la figura anterior es -0,3974
 - ❖ Mediante la aplicación de un test de hipótesis estadístico se llegó a la conclusión de que esta correlación resulta significativa

Análisis exploratorio

- Establecimiento de vínculos entre parámetros:
- ❖ Influencia por ejemplo de actividades industriales o del tráfico vehicular en la calidad del aire



Análisis exploratorio

- Identificación de tendencias temporales de calidad del aire:

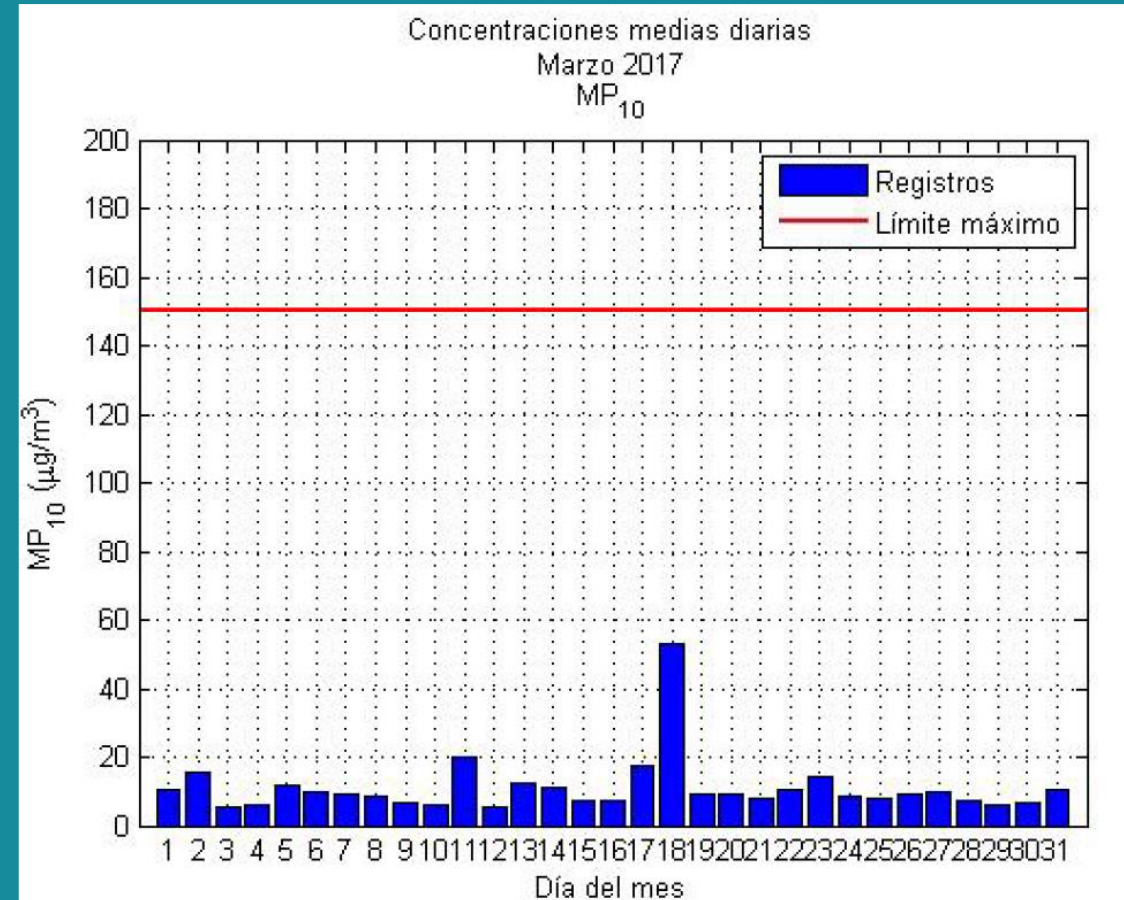
- ❖ Aplicaciones:

- Desarrollo de planes de mejora de calidad del aire
- Evaluación del desempeño de sistemas de control de emisiones
- Evaluación de la capacidad de un sitio determinado para recibir nuevos emprendimientos
- Priorizar inversiones y líneas de acción



Evaluación del cumplimiento de normativa

- Procesamiento de las concentraciones de contaminantes registradas de forma tal de permitir la comparación con estándares de calidad del aire
- Para el análisis del efecto potencial de nuevos emprendimientos en la calidad del aire, las concentraciones de contaminantes generadas por el nuevo emprendimiento (modeladas) deben sumarse a las concentraciones de contaminantes de base



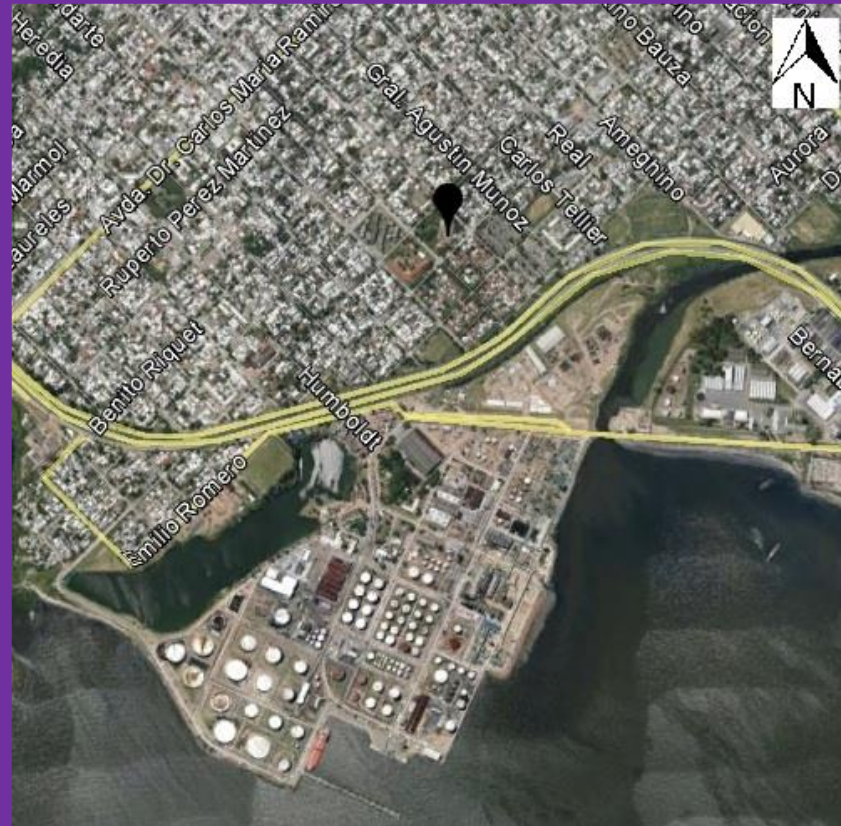
Monitoreo de calidad del aire en el barrio La Teja de Montevideo (ANII-FSE “Modelo integral de emisiones gaseosas y particuladas a la atmósfera: Análisis de una zona industrial y residencial de Montevideo”, IMFIA)

Contenido

- Introducción
- Monitoreo de calidad del aire y emisiones
- Redes de monitoreo de calidad del aire
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Montevideo
- Procesamiento de registros
- Ejercicio

Ejercicio

- A partir de los datos proporcionados:
 - ❖ Identificar fuentes emisoras relevantes
 - ❖ Evaluar el cumplimiento del objetivo diario (Guías OMS y Decreto actual)
 - ❖ Identificar gráficamente eventos de alta concentración (valores superiores al promedio más dos desviaciones estándar)
 - ❖ Vincular las concentraciones de PM_{10} con la velocidad del viento y la temperatura ambiente (realizar comentarios)



Monitoreo de calidad del aire en el barrio La Teja de Montevideo (ANII-FSE "Modelo integral de emisiones gaseosas y particuladas a la atmósfera: Análisis de una zona industrial y residencial de Montevideo", IMFIA)