

Gestión de Calidad Ambiental

Módulo
Calidad del Aire

2024



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

- **Emisión:** descarga de contaminantes a la atmósfera que se realiza desde una fuente determinada. Es el inicio de los episodios de contaminación atmosférica
- **Emisor:** toda fuente capaz de emitir contaminantes a la atmósfera, pudiendo tener un origen natural o antropogénico

Clasificación

Según su posición en el tiempo:

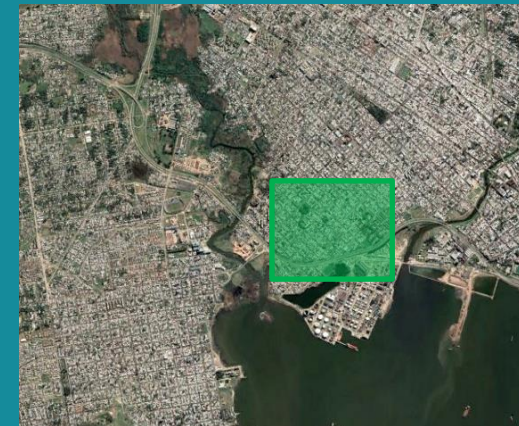
- Fijas
- Móviles

Según su naturaleza:

- Naturales (erupciones volcánicas, incendios forestales, entre otros eventos)
- Antropogénicas

Según su representación a la escala de trabajo:

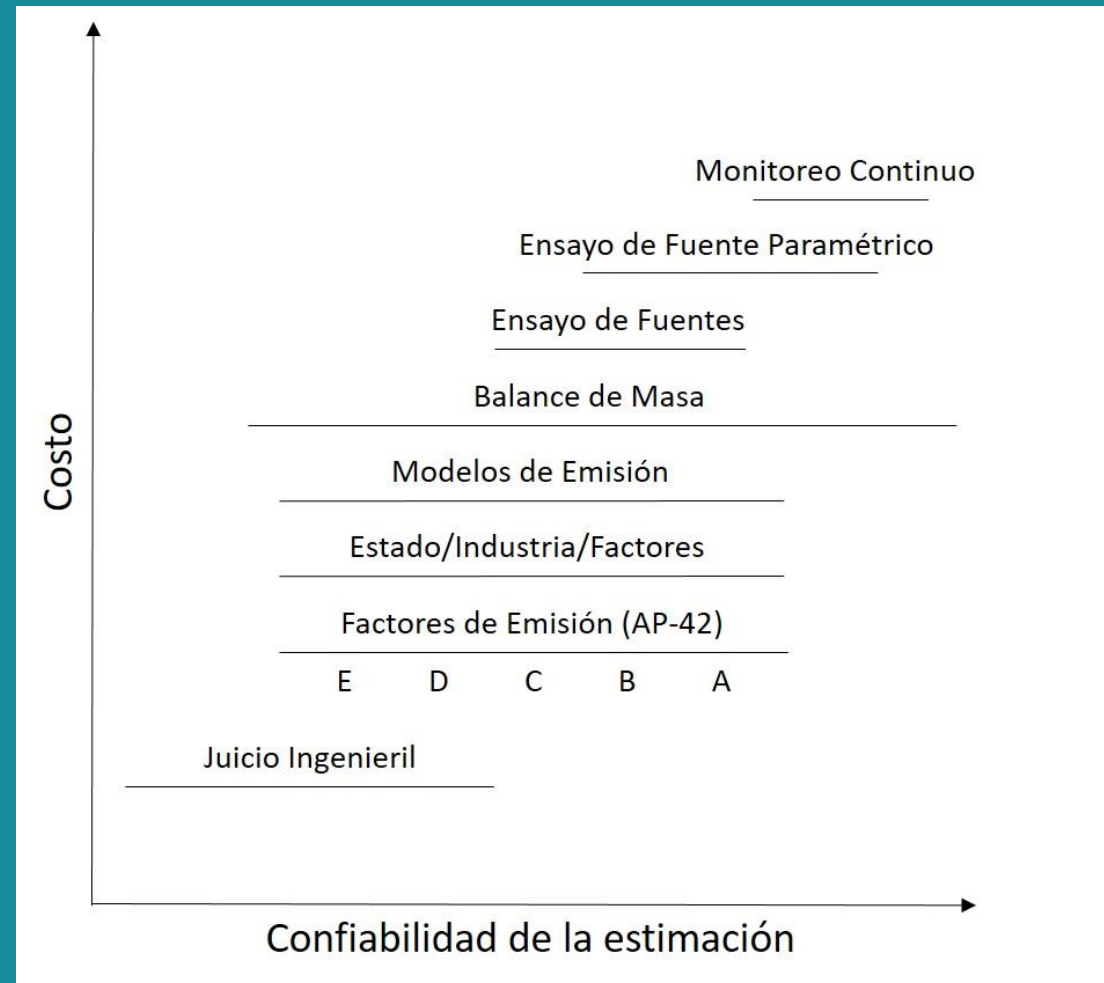
- Puntuales
- Lineales
- Superficiales



Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

Métodos de estimación de emisiones



Adaptado de USEPA, 1995

Métodos de estimación de emisiones

- **Monitoreo continuo:** consiste en realizar una medición continua de las concentraciones de contaminantes emitidas
- **Ensayo de fuentes:** consiste en la medición de la concentración de contaminantes, en períodos de tiempo cortos, en muestras extraídas de la chimenea (las condiciones de muestreo deben representar a las condiciones de operación)
- **Balance de masa:** consiste en estimar la masa de contaminante emitido a través del análisis de un volumen de control (utilizado en general para emisiones de evaporación)
- **Factores de emisión:** se basa en aplicar un cierto factor que vincula las emisiones atmosféricas de forma proporcional con algún dato de actividad

Ejemplo de monitoreo continuo

- Planta UPM II:
- ❖ Cuenta con una chimenea principal de descarga a la atmósfera de 130 metros de altura

Tabla 5-16 Evaluación de cumplimiento de compromisos para caldera de biomasa

(período: 15/10/2023 - 31/03/2024)

Parámetro	Control base diaria					Control base anual			
	VLE: Concentración media diaria (mg/Nm ³)	Cantidad de días de superación al VLE (como % del período de tiempo analizado).		Cantidad de días de superación al 230 % del VLE.		Concentración media anual (mg/Nm ³)		% disponibilidad de los medidores en línea	
		Valor máximo	Valor calculado para UPM II	Valor máximo	Valor calculado para UPM II	Valor máximo	Valor calculado para UPM II	Valor mínimo	Valor calculado para UPM II
Material Particulado	30	10	0	0	0	15	0	95	93
SO ₂	350	10	0	0	0	240	44	95	96
NOx (como NO ₂)	280	10	5	0	0	240	199	95	96
TRS (como H ₂ S)	1,80	10	6	0	0	0,90	0.43	95	96

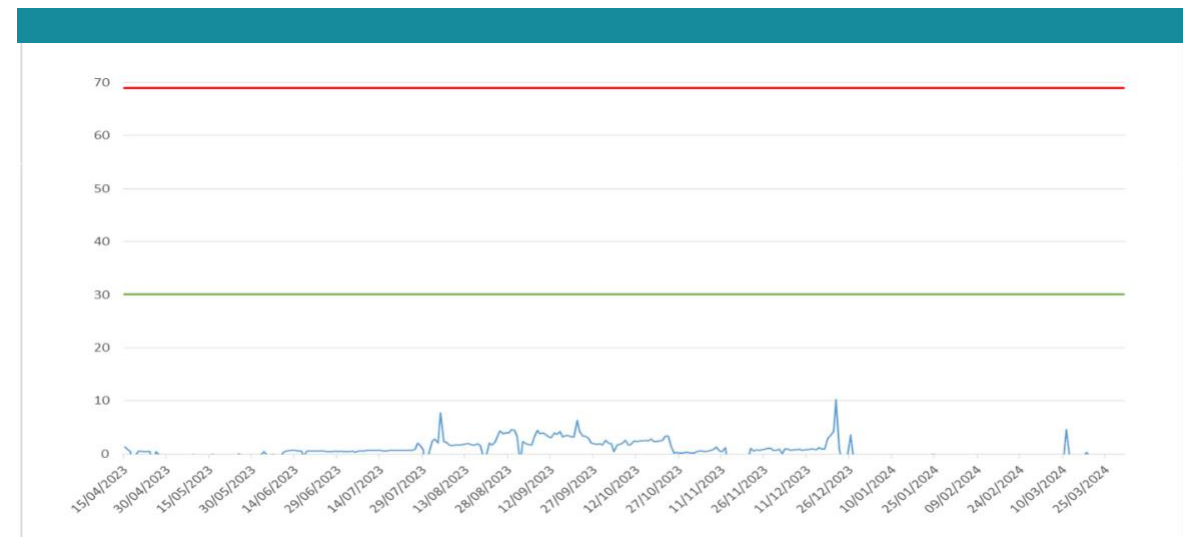
Tabla 5-15 Promedio de concentraciones y carga de contaminantes en caldera de biomasa

(período: 14/04/2023 - 31/03/2024)

Parámetro	Concentración media (mg/Nm ³)	Carga promedio (kg/ADt)
Material Particulado	0,78	0,0003
SO ₂	27,92	0,016
NOx (como NO ₂)	197,73	0,091
TRS (como H ₂ S)	0,84	0,0005

Concentración y carga por unidad de producción promedio anual para cada contaminante monitoreado en forma automática

(<https://www.ambiente.gub.uy/oan/wp-content/uploads/2018/02/Informe-de-control-operacional-y-desempeno-ambiental-del-primer-ano.pdf>)



DATO PM PROM DIARIO - NIVEL MÁX AUTORIZADO - NIVEL MÁX ABSOLUTO (230 % DE LA AUTORIZACIÓN)

Métodos de estimación de emisiones

- **Factores de emisión:** se basa en aplicar un cierto factor que vincula las emisiones atmosféricas de forma proporcional con algún dato de actividad:

- ❖ Se aplica para obtener promedios de emisiones en largos períodos

- ❖ Se aplica preferentemente sobre un conjunto de fuentes

- ❖ Ecuación básica:

$$E = A * FE * \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

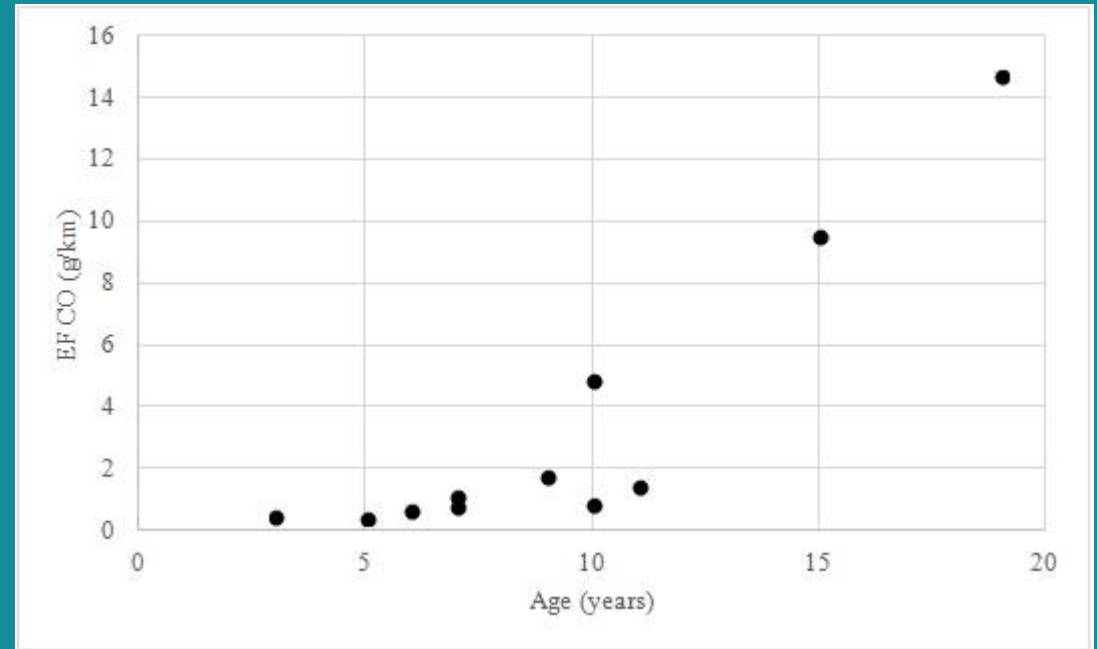
- E: emisión de un cierto contaminante (por ejemplo, en kg/año)
- A: actividad (por ejemplo, consumo de combustible en m³/año)
- FE: factor de emisión (por ejemplo, en kg emitidos de cierto contaminante por m³ de combustible consumido; Unión Europea, Estados Unidos, desarrollos propios)
- ER: eficiencia de remoción de cierto contaminante antes de la emisión (%)

Métodos de estimación de emisiones

- **Factores de emisión:** se basa en aplicar un cierto factor que vincula las emisiones atmosféricas de forma proporcional con algún dato de actividad:

- ❖ Fuentes de factores de emisión:

- Unión Europea
- Estados Unidos
- Desarrollos propios



Muestreo de emisiones vehiculares en movimiento en Montevideo y factores de emisión desarrollados para cada vehículo, analizados en función de su antigüedad.

M. D'Angelo, E. González, N. Rezzano, First approach to exhaust emissions characterization of light vehicles in Montevideo, Uruguay. Science of the Total Environment, 618: 1071-1078., 2018.

Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

Inventarios de emisiones

- **Definición:** estimación de las emisiones de todos los contaminantes de interés emitidos a la atmósfera por las diversas actividades humanas y por fuentes de origen natural, para un período y área geográfica determinada (adaptado de PNUMA, 2000)
- **Objetivos:**
 - ❖ Establecer una línea de base cuantitativa de emisiones atmosféricas con cierta escala espacial y temporal (identificación de áreas geográficas críticas y de sectores y actividades con mayor generación de emisiones)
 - ❖ Diseño y evaluación de políticas públicas de gestión de la calidad del aire
 - ❖ Informar a la población sobre los niveles de emisiones atmosféricas
 - ❖ Evaluar tendencias de emisiones atmosféricas

Inventarios de emisiones

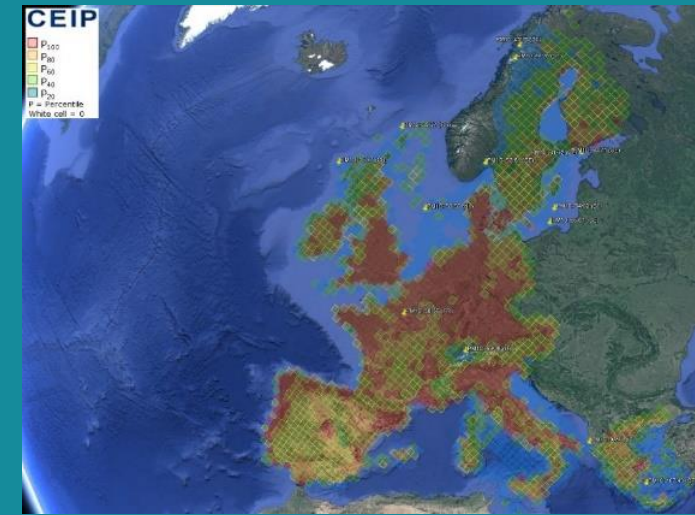
- **Definición:** estimación de las emisiones de todos los contaminantes de interés emitidos a la atmósfera por las diversas actividades humanas y por fuentes de origen natural, para un período y área geográfica determinada (adaptado de PNUMA, 2000)
- **Objetivos:**
 - ❖ Simular escenarios futuros de emisiones atmosféricas (por ejemplo, con respecto a la instalación de nuevos emprendimientos)
 - ❖ Suministrar datos de emisiones a ser utilizados en modelos de dispersión atmosférica
 - ❖ Diseñar sistemas de control de emisiones
- **Metodología de cálculo:** método de factores de emisión

Inventarios de emisiones

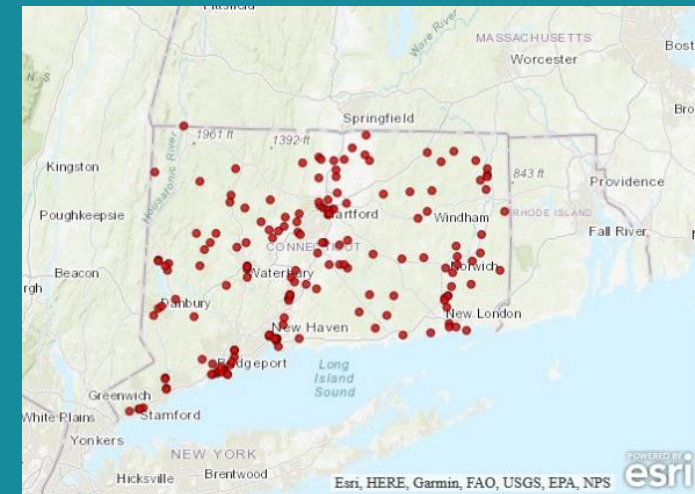
- Fuentes de incertidumbre:
 - ❖ Incertidumbre en los datos de actividad
 - ❖ Omisión de fuentes emisoras relevantes
 - ❖ Incertidumbre en la información demográfica y socio-económica utilizada para la distribución de los consumos y de las emisiones (por ejemplo, distribución de consumos por población o por flota vehicular)
 - ❖ Incertidumbre en los factores de emisión considerados (aplicación de factores de emisión desarrollados en otros países)
 - ❖ Incertidumbre en el uso de dispositivos de control de emisiones

Antecedentes internacionales

- Unión Europea:
 - ❖ Frecuencia anual
 - ❖ Resultados disponibles en línea
- Estados Unidos:
 - ❖ Frecuencia trienal (una vez cada tres años)
 - ❖ Visualizador gráfico en línea para fuentes puntuales



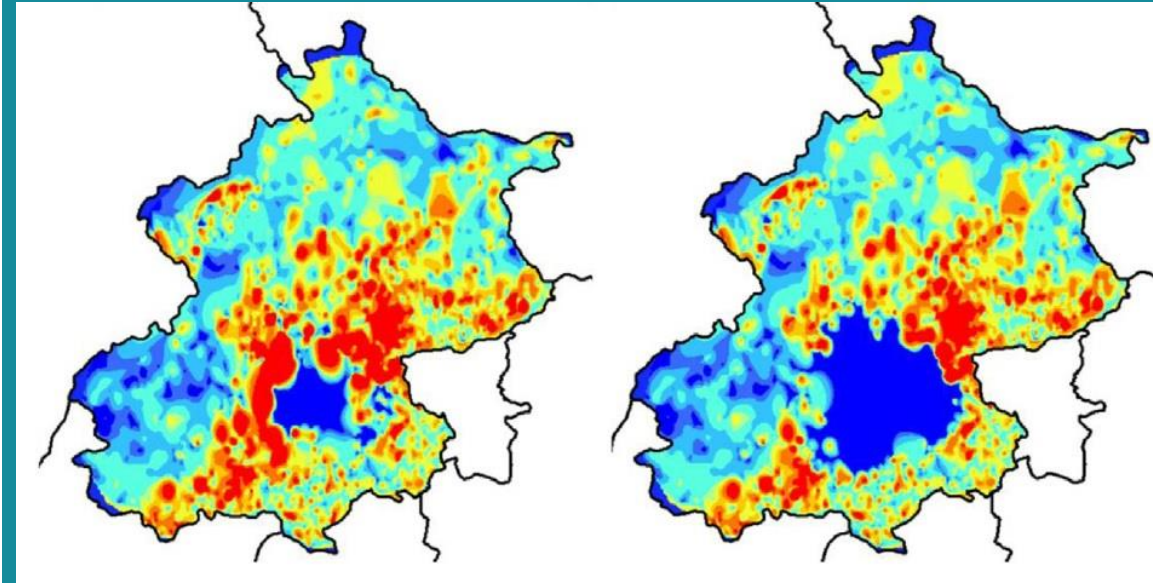
Emisiones de PM₁₀ para el año 2015 correspondientes a los países europeos del Grupo EU-15. Fuente: EMEP/CEIP.



Fuentes emisoras puntuales de PM₁₀ en el estado de Connecticut para 2014. Fuente: USEPA.

Antecedentes internacionales

- China:
- ❖ Escenarios de reducción de emisiones:
 - Ampliación del área de restricción de uso del carbón para combustión residencial en Beijing
 - Contaminante objetivo: $PM_{2,5}$



Emisiones residenciales de $PM_{2,5}$ en enero para distintos escenarios de uso de carbón. El escenario de la derecha es el más restrictivo.

S. Cai, Q. Li, S. Wang, J. Chen, D. Ding, B. Zhao, D. Yang, J. Hao, Pollutant emissions from residential combustion and reduction strategies estimated via a village-based emission inventory in Beijing. Environmental Pollution, 238: 230-237., 2018.

Principales sectores emisores en Uruguay

- Industrial
- Vehicular
- Residencial
- Comercios y Servicios
- Agropecuario
- Rodadura
- Erosión Eólica

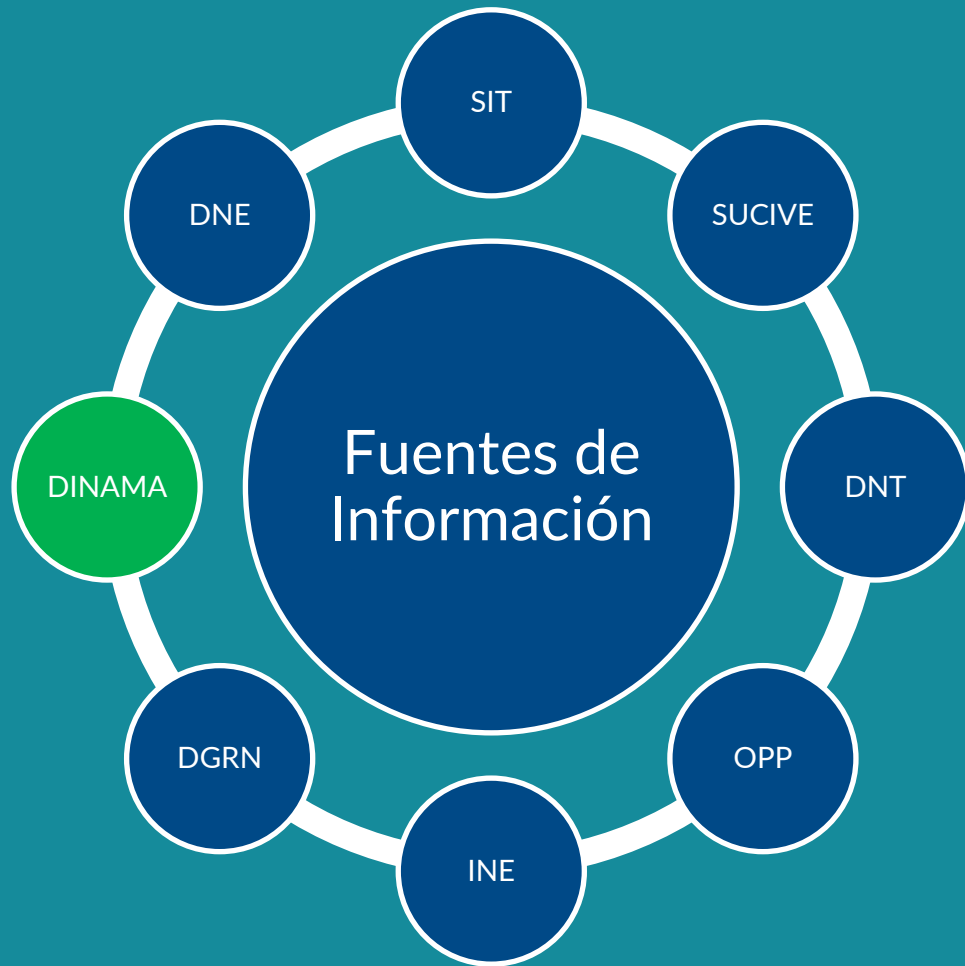


Tránsito en Montevideo (<https://970universal.com/2020/12/09/el-movimiento-del-transito-en-montevideo-se-mantiene-estable-a-pesar-de-las-medidas-del-gobierno/>)



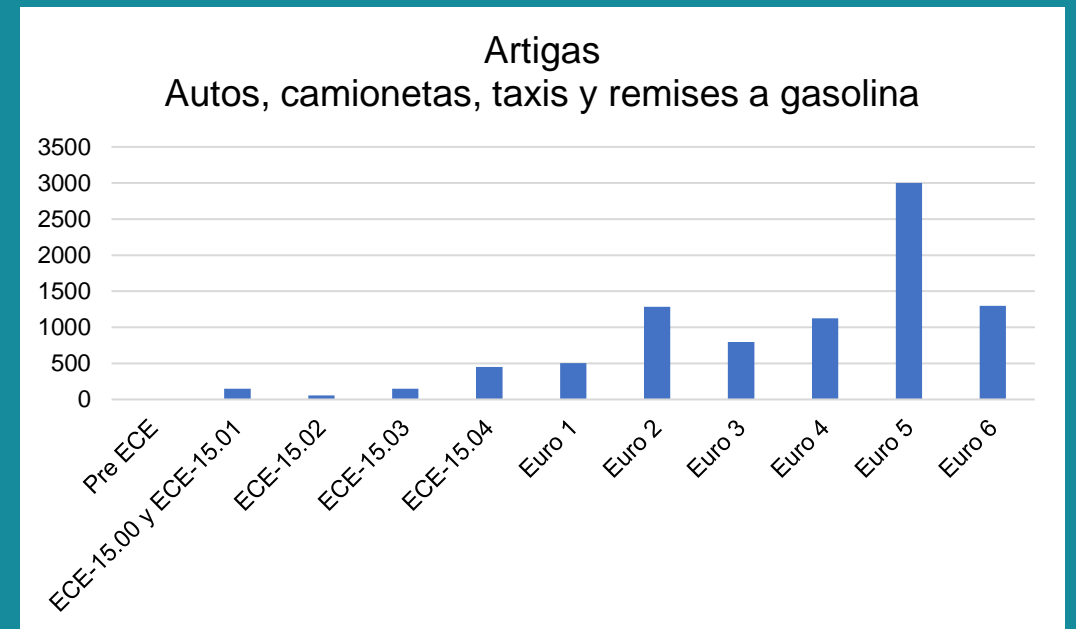
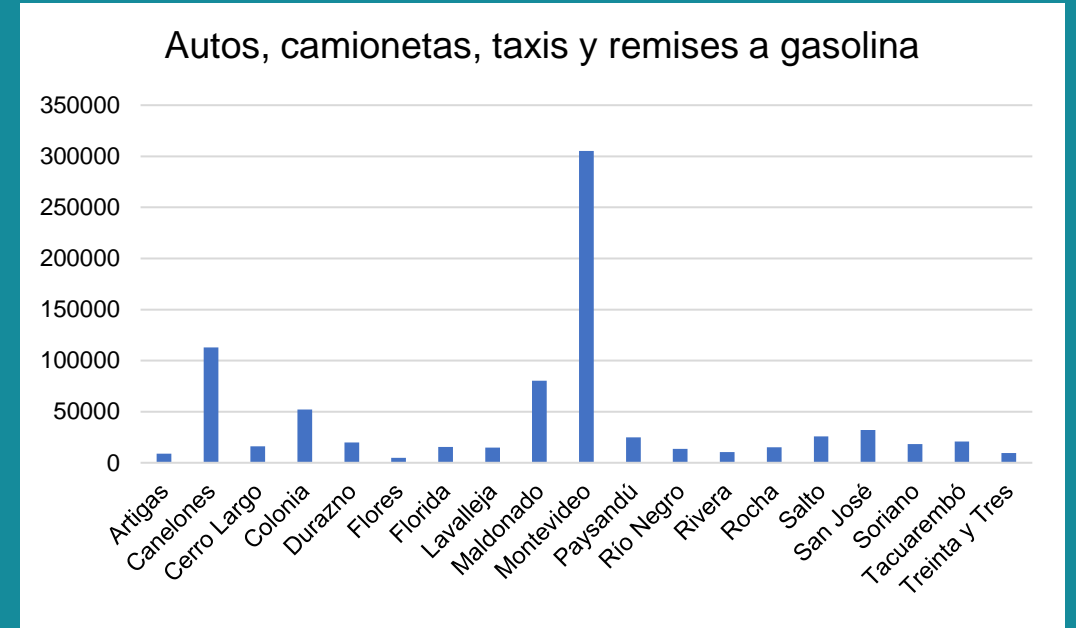
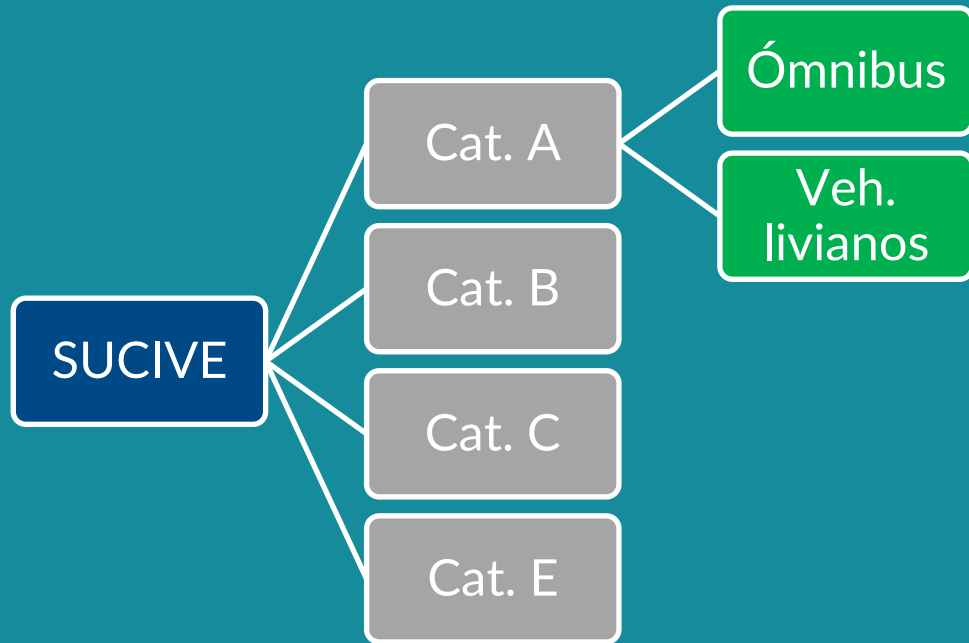
UPM Fray Bentos (<https://www.upm.uy/novedades/todas-las-noticias/2018/06/planta-recibio-30.000-visitantes/>)

Fuentes de información nacionales



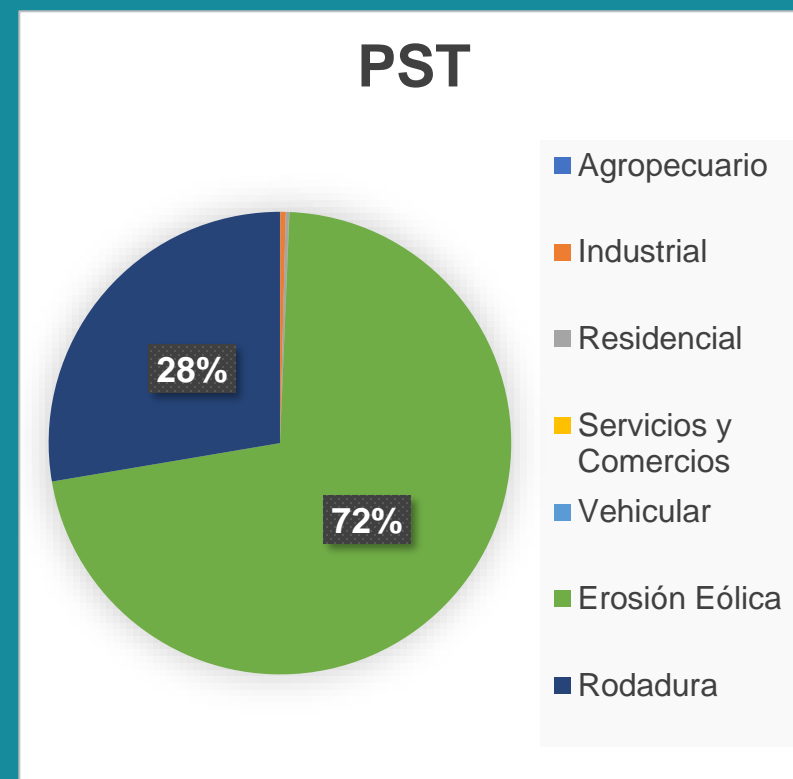
Sector Industrial

Fuentes de información nacionales



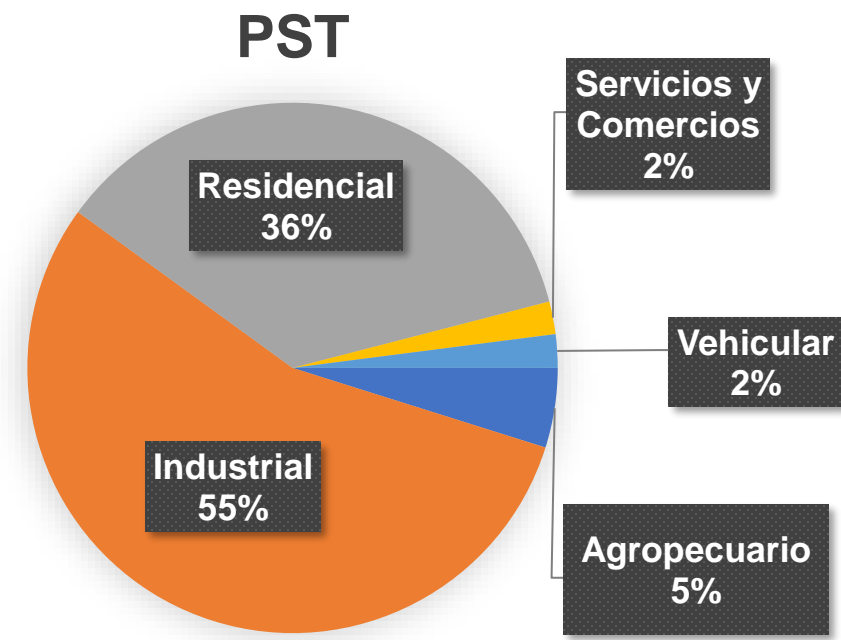
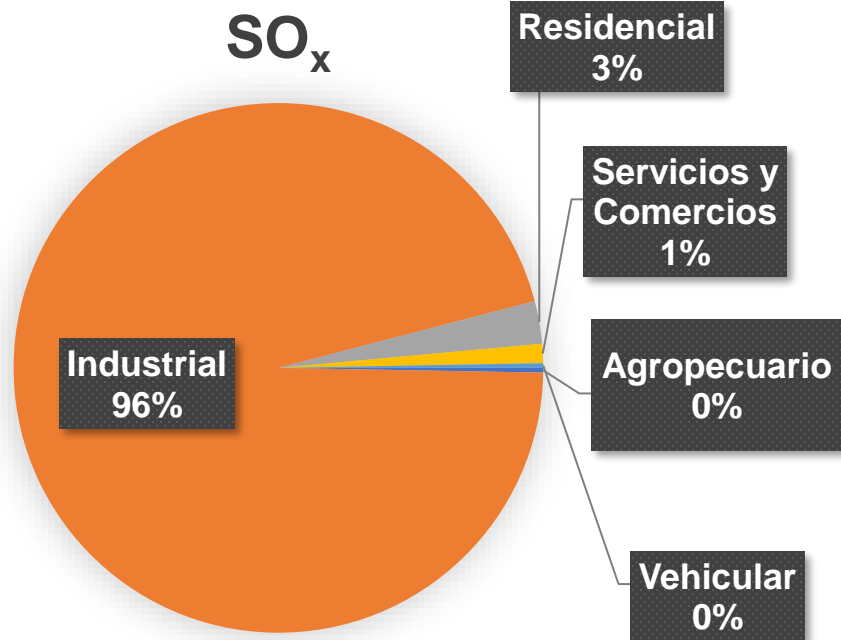
Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Importancia de los sectores Erosión Eólica y Rodadura en las emisiones nacionales de partículas:



Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

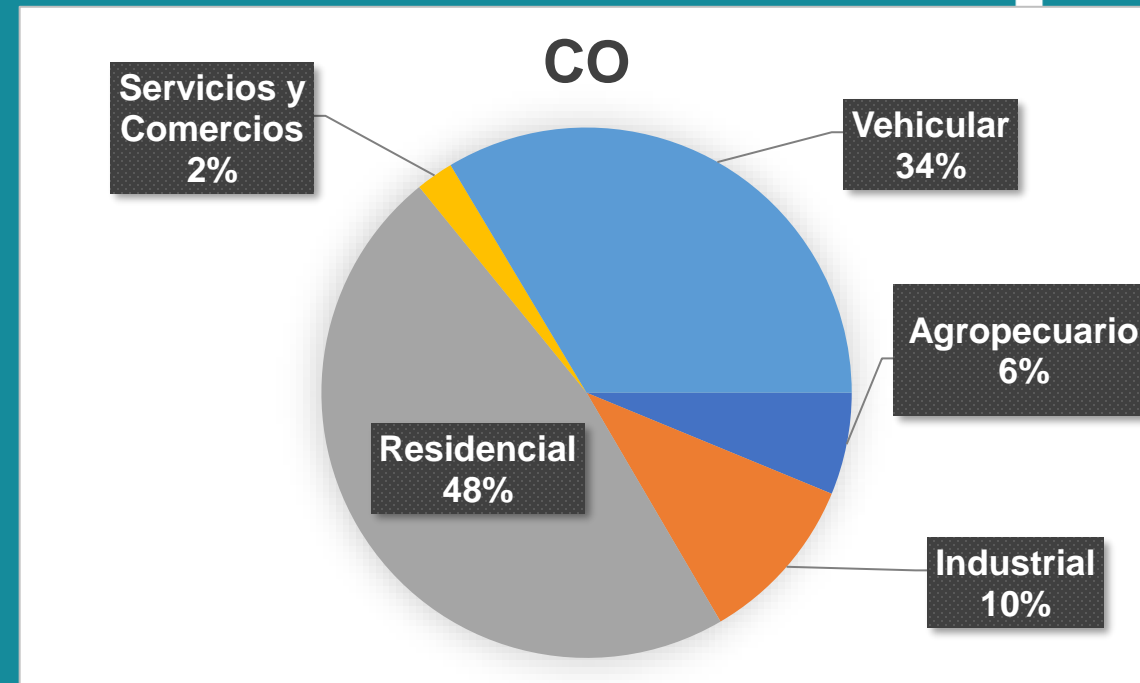
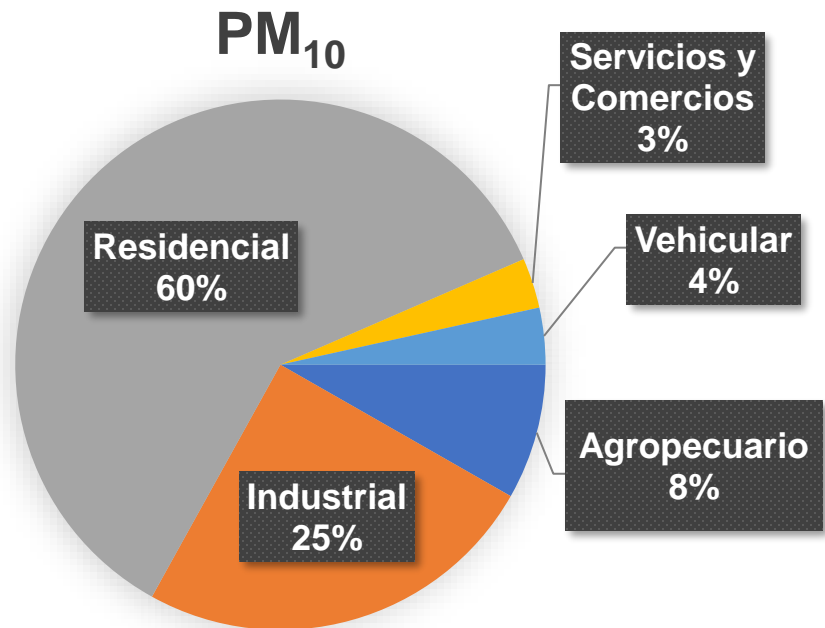
Resultados sin los sectores Erosión Eólica y Rodadura:



SO_x: óxidos de azufre (SO₂ + SO₃)

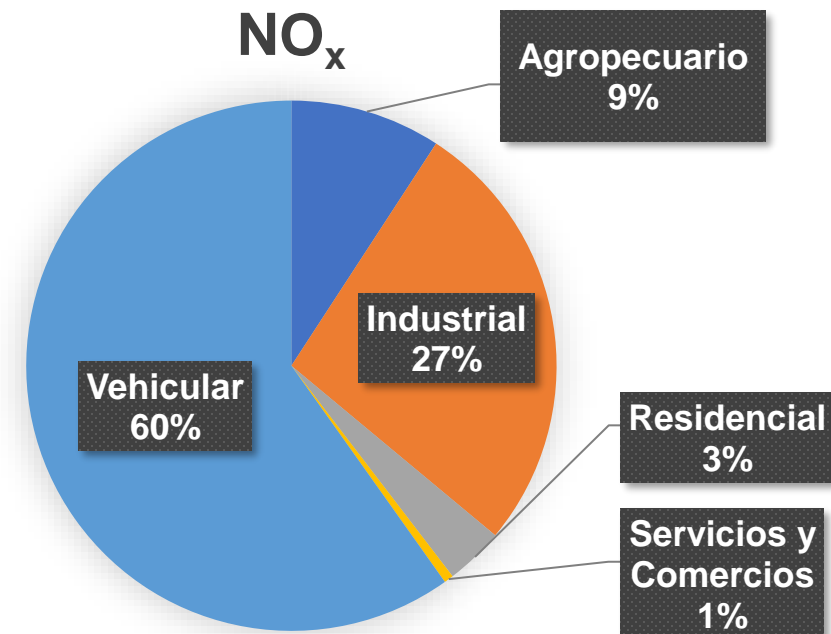
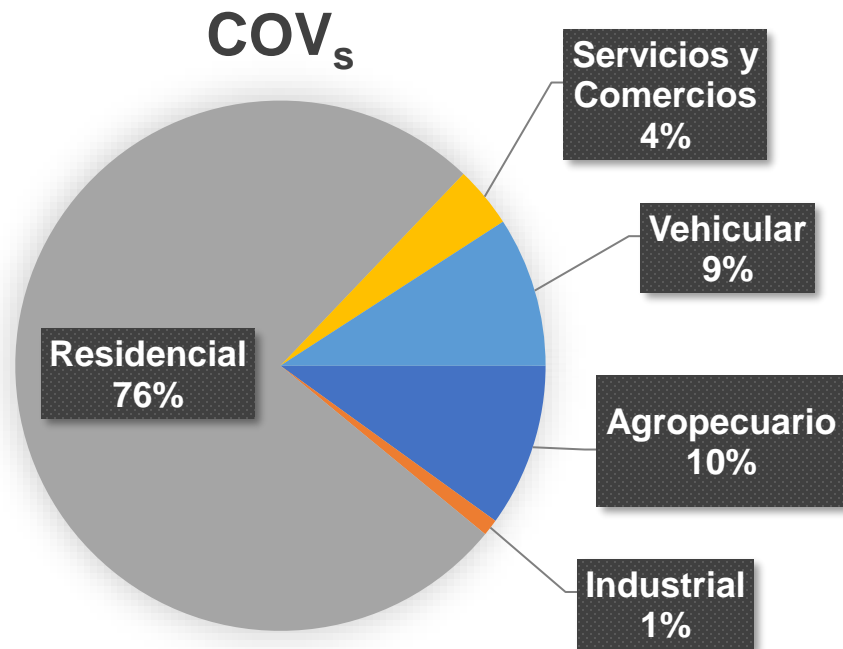
Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Resultados sin los sectores Erosión Eólica y Rodadura:



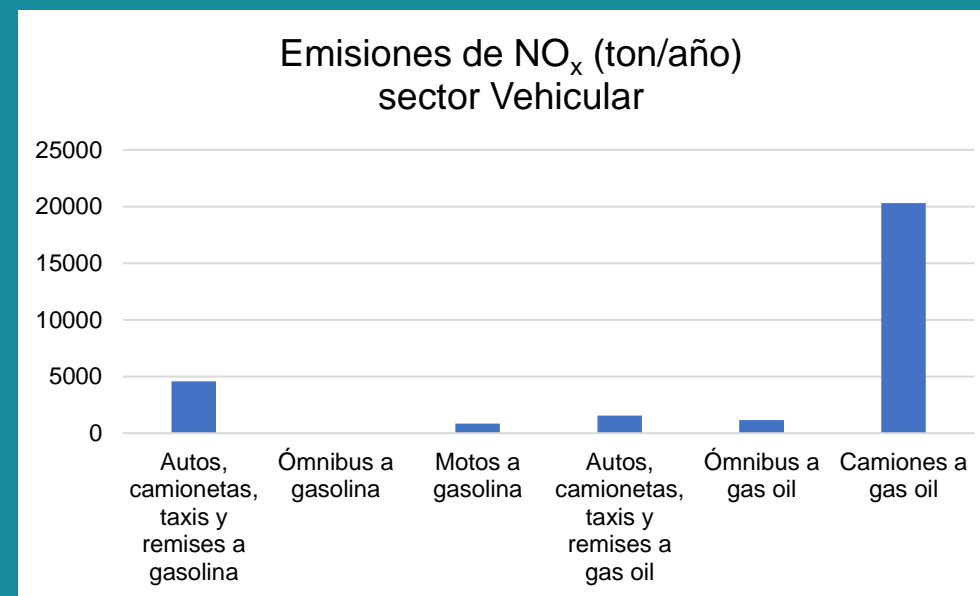
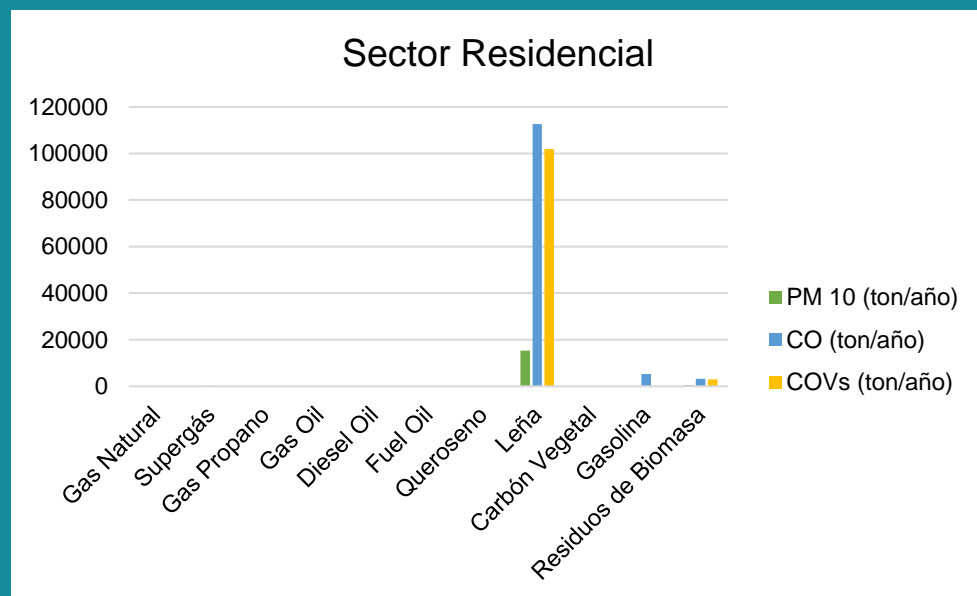
Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Resultados sin los sectores Erosión Eólica y Rodadura:



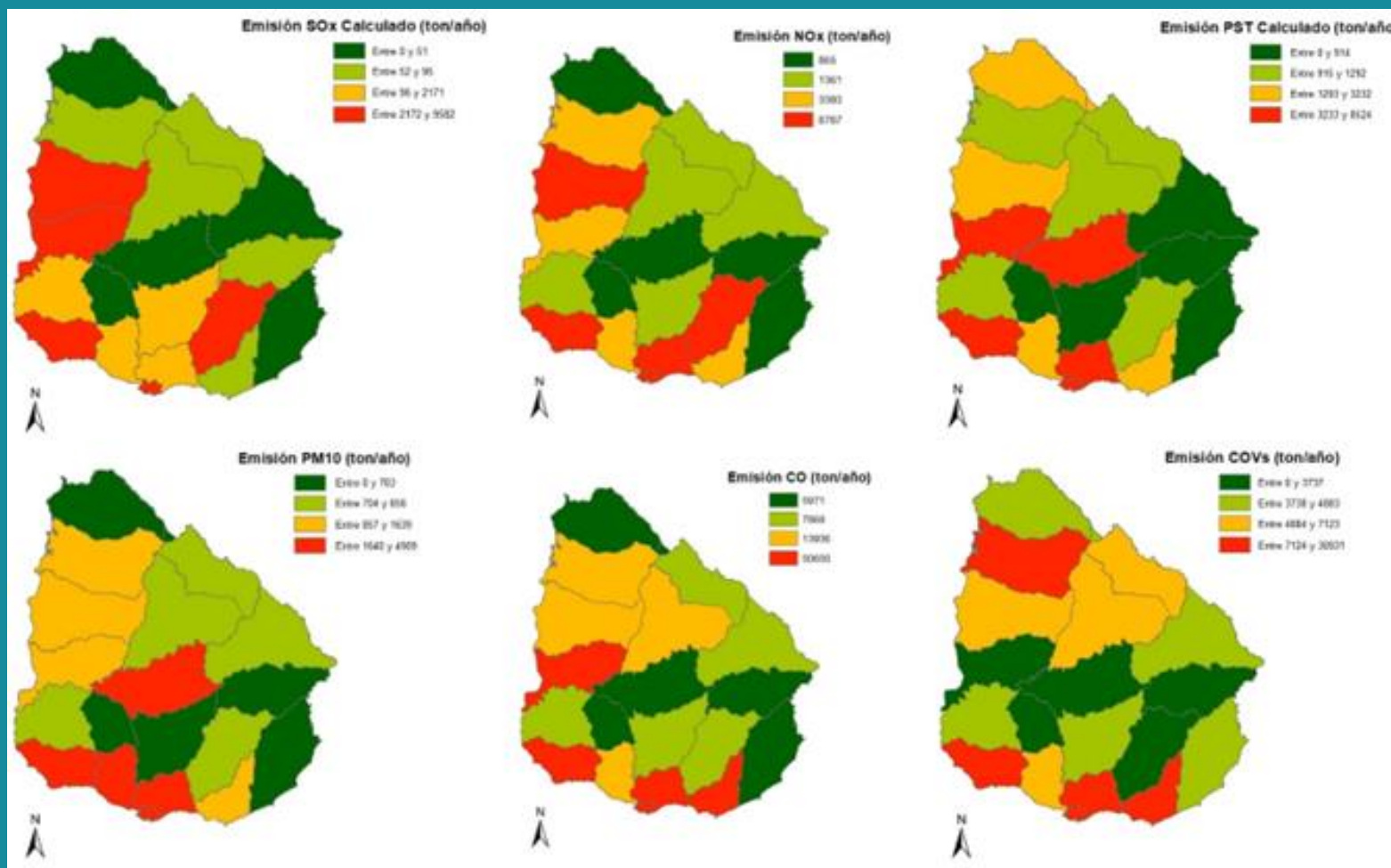
Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Resultados sin los sectores Erosión Eólica y Rodadura:



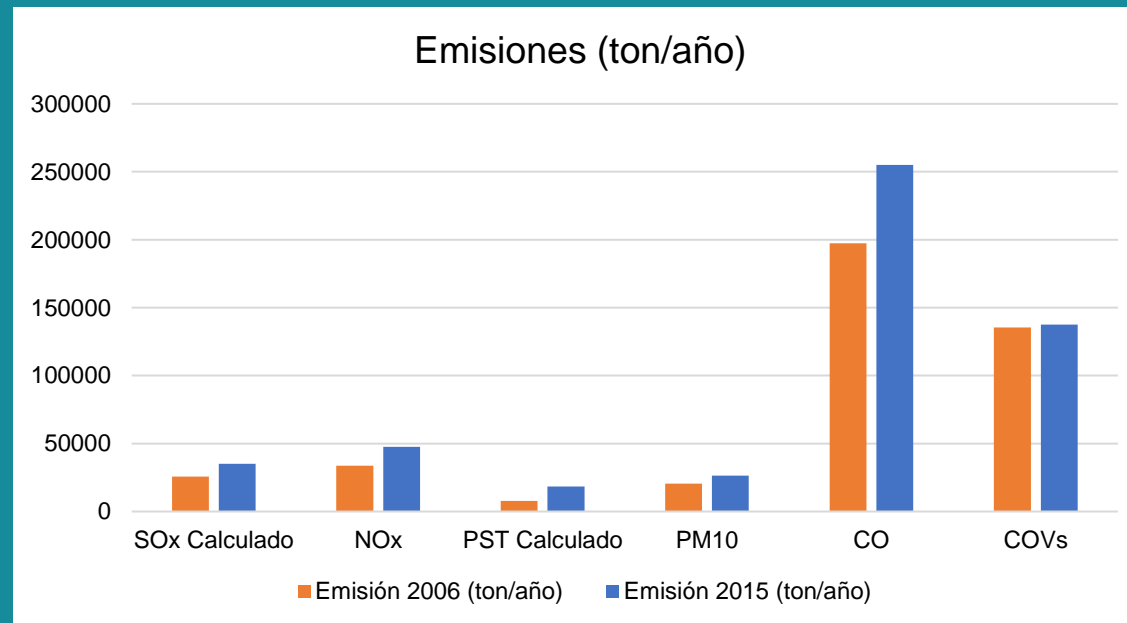
Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Resultados sin los sectores Erosión Eólica y Rodadura:



Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Resultados sin los sectores Erosión Eólica y Rodadura:



Los sectores emisores principales dependen del contaminante atmosférico que se considere

¿Qué implicancias puede tener esto?



Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

Laboratorio de Ensayos de Calefactores Domésticos

- Construido en el marco del Proyecto ANII-FSE “*Determinación experimental de rendimiento energético y emisiones atmosféricas: aportes para la eficiencia energética en el sector residencial biomasa*”
- Norma de referencia: UNE-EN 16510-1:2019 “*Equipos de calefacción residencial alimentados con combustible sólido. Parte 1: Requisitos generales y métodos de ensayo*” (ahora existe una norma nacional: *Norma UNIT 1370-1 (2021)*)
- Principales ensayos que se realizan:
 - ❖ Ensayo de prestaciones a potencia nominal (determinación de potencia, rendimiento y emisiones)
 - ❖ Ensayo de seguridad por temperatura

Laboratorio de Ensayos de Calefactores Domésticos

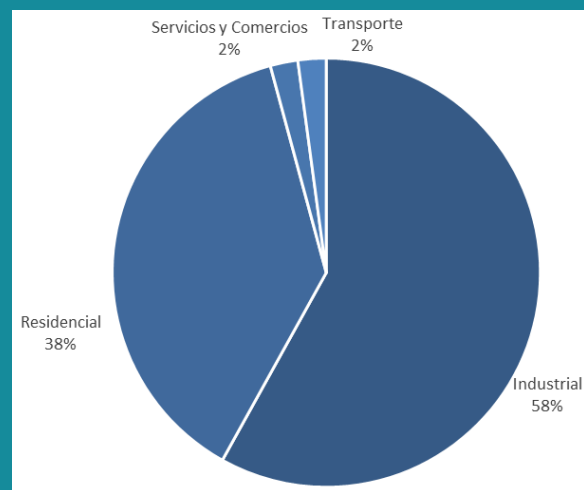
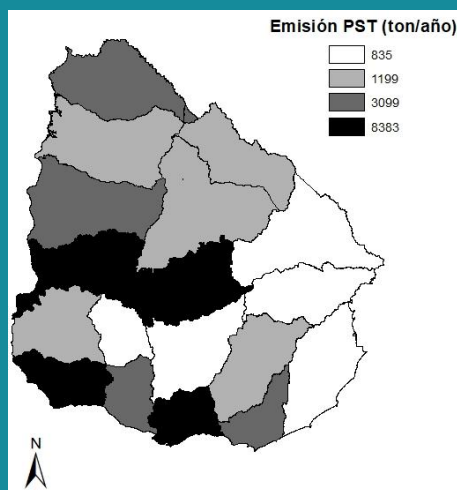


Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

Análisis de escenarios futuros de emisiones

- Zonas urbanas de Uruguay (no se consideran los sectores Erosión Eólica, Rodadura y Agropecuario)
- Estimación de emisiones de PST al año 2030, utilizando proyecciones futuras oficiales de consumo de energía, y considerando como año base el 2015
- Comparación con meta oficial de reducción de emisiones

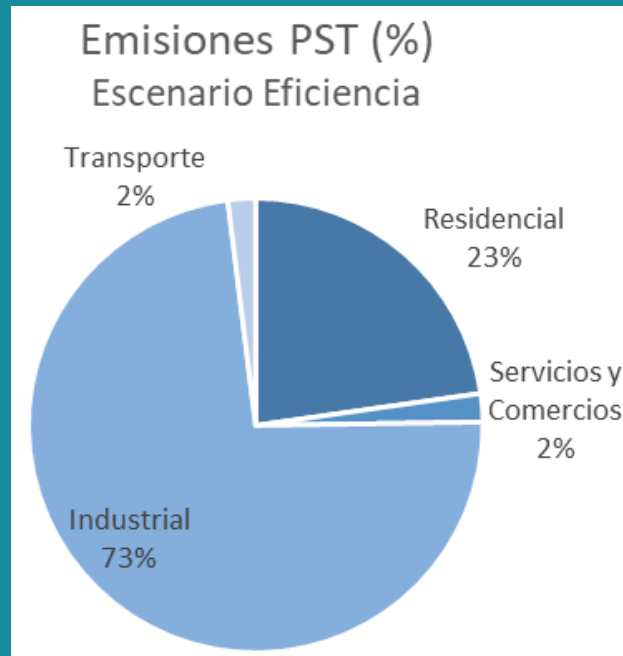
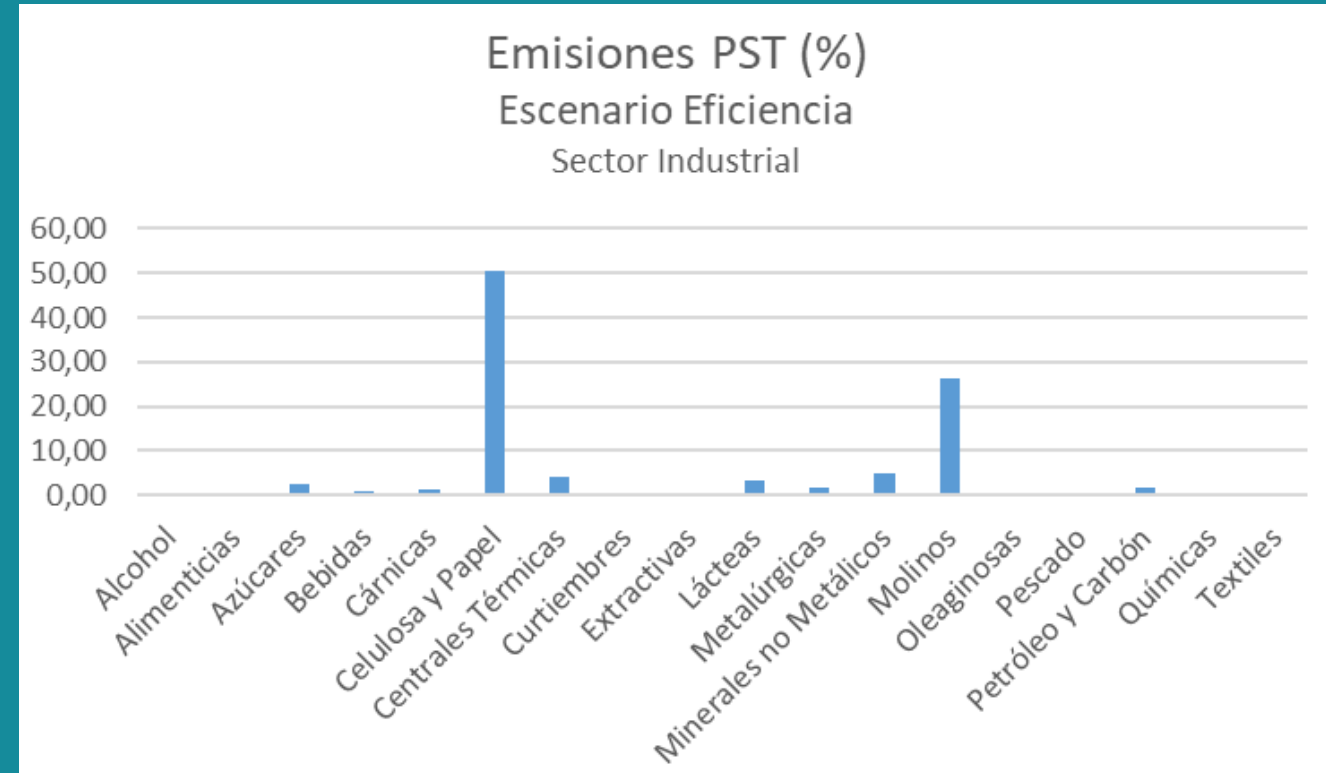
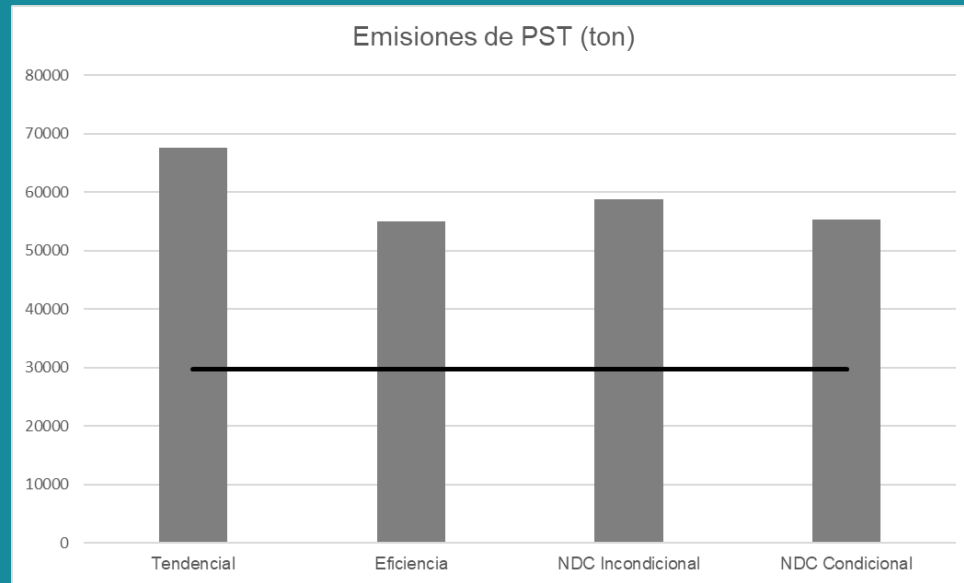


M. D'Angelo, I. Franchi, N. Rezzano, J. Cataldo, Análisis del Inventario de Emisiones Atmosféricas de Uruguay 2015: Evaluación del Cumplimiento de Políticas Ambientales de Contaminación Atmosférica en Relación al Consumo de Energía en Zonas Urbanas. XXXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2021.

Análisis de escenarios futuros de emisiones

- Escenarios futuros oficiales de consumo de energía:
 - ❖ Tendencial: el consumo de energía varía en función del cambio de parámetros socio-económicos
 - ❖ Eficiencia: el consumo energético varía considerando la aplicación de diversas políticas de eficiencia energética sobre el escenario Tendencial
 - ❖ NDC Incondicional: la demanda de energía varía considerando las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a las que Uruguay se ha comprometido para el año 2025
 - ❖ NDC Condicional: equivalente al escenario anterior, pero considerando que Uruguay recibe recursos adicionales para la implementación de medidas

Análisis de escenarios futuros de emisiones



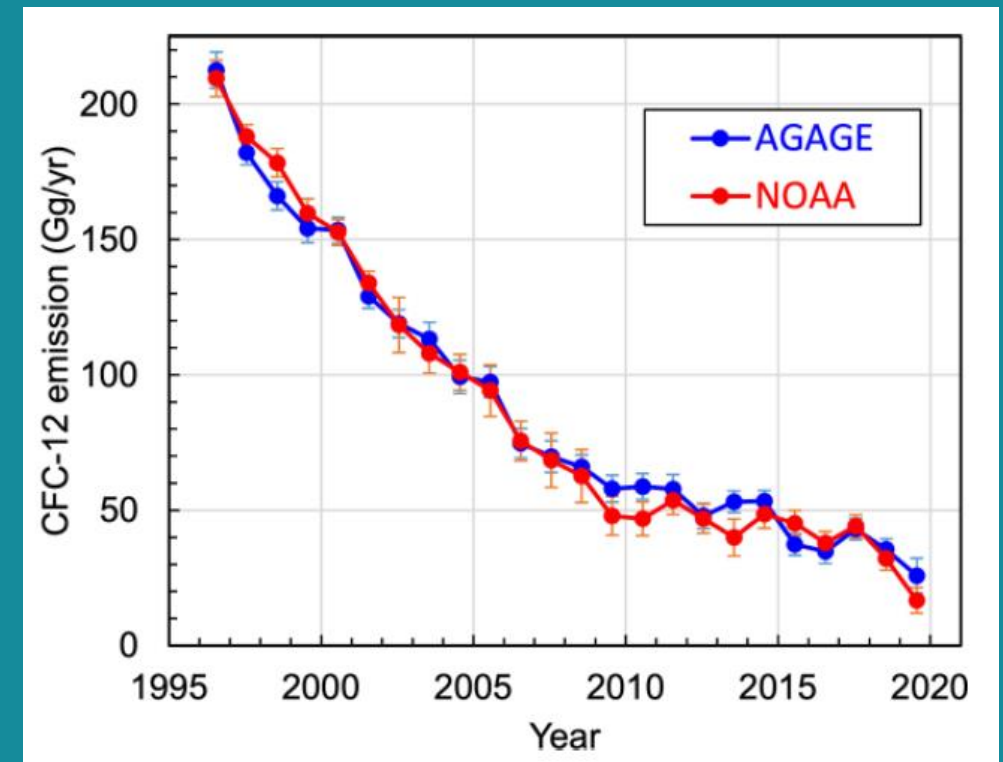
Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero

- Gases de efecto invernadero (GEI):
 - ❖ Son capaces de absorber radiación infrarroja
 - ❖ Este exceso de energía se transfiere a otras moléculas por colisión molecular, y esto aumenta la temperatura del aire y colabora con el calentamiento de la Tierra
 - ❖ Es deseable que existan estos gases y el efecto invernadero como tal para posibilitar, entre otras cosas, la vida en sus formas actuales
 - ❖ Lo que se considera un proceso problemático es la intensificación del efecto invernadero natural y de sus potenciales consecuencias a nivel general

Principales GEI

- Vapor de agua (es el que posee mayor capacidad de absorción)
- Dióxido de carbono (su concentración crece a razón de 0,5 % anual)
- Metano (su tasa de crecimiento es de 1,1 % anual y su tiempo de residencia es igual a 10 años)
- Óxido nitroso (crece a razón de 0,5 % anual y su tiempo de residencia es del orden de 100 años)

Potencial de calentamiento atmosférico	
Sustancia	PCA
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	310

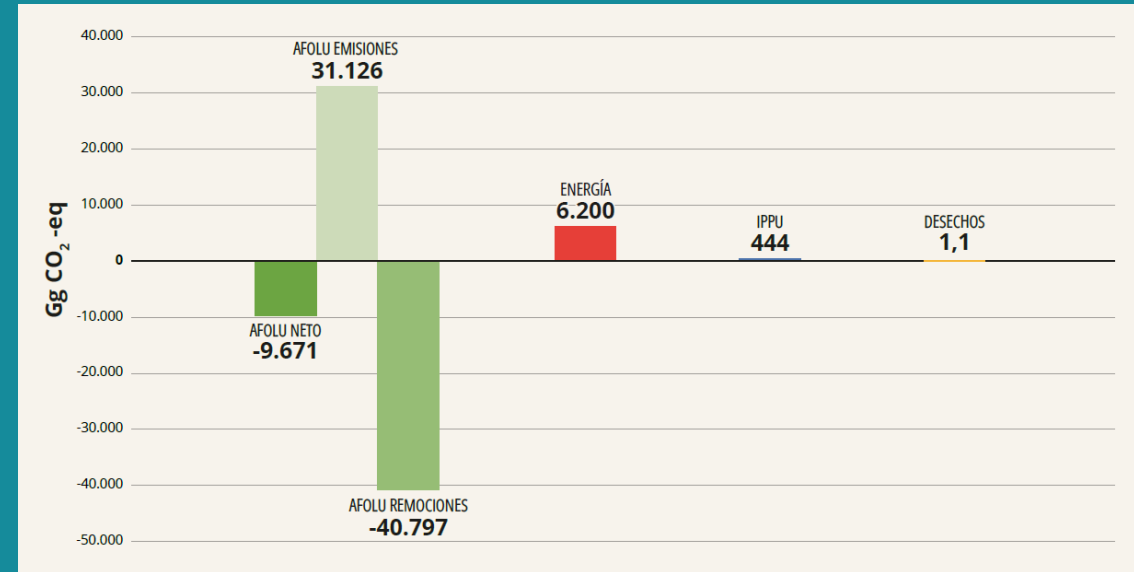
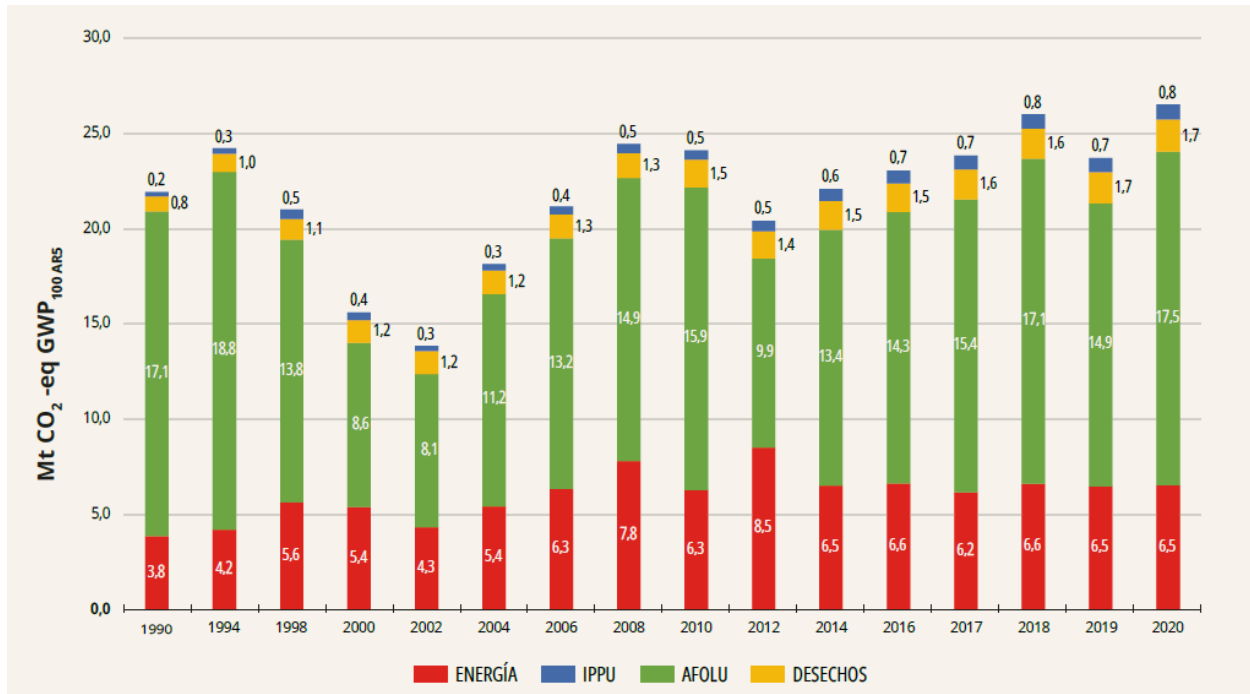


Evolución de emisiones de CFC-12

(<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03260-5>)

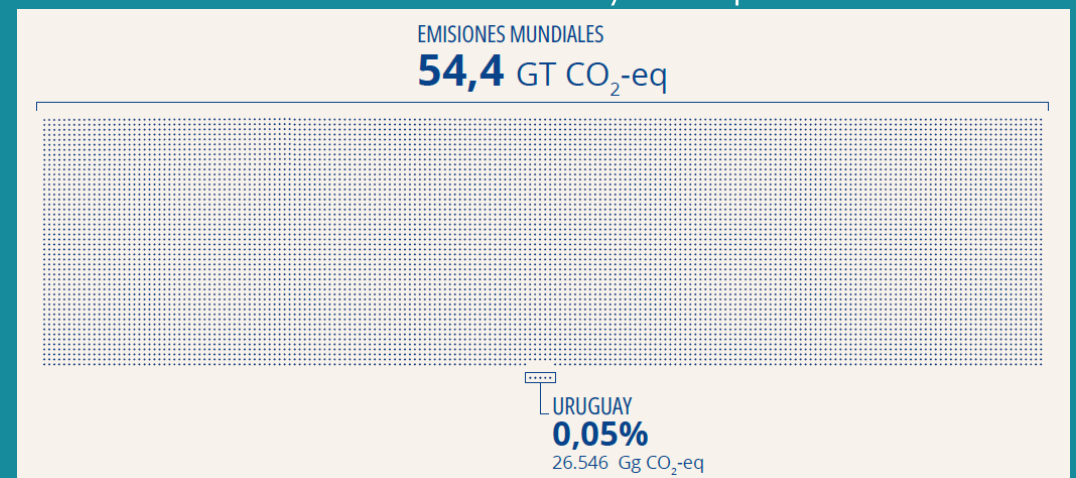
Situación nacional

- Uruguay elaboró su primer Inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) para el año de referencia 1990
- Para elaborarlos se aplica la metodología de factores de emisión



Emisiones nacionales de CO₂ por sector, 2020
https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2024-01/INGEI_Serie_1990-2020.pdf

AFOLU: Agricultura, forestación y otros usos de la tierra (se destaca la fermentación entérica)
 IPPU: Procesos industriales y uso de productos



Contenido

- Fuentes de emisión
- Estimación de emisiones
- Inventarios de emisiones
- Visita
- Inventarios de emisiones
- Sistemas de control de emisiones
- Ejercicio

Sistemas de control de emisiones

- En muchas ocasiones se utiliza el mismo mecanismo de captación de contaminantes atmosféricos en el marco del control de emisiones y en el monitoreo
- En ambas aplicaciones, un objetivo central es lograr una eficiencia de captación cercana al 100 %
- La principal diferencia entre estas dos operaciones es la cantidad de contaminante recolectada: mientras que en el monitoreo se colectan pequeñas cantidades de contaminante (en el orden de μg o mg), durante el control de emisiones se colectan mayores cantidades (en el orden de kg) con el objetivo de disminuir las emisiones atmosféricas

Sistemas de control de emisiones



- Una instalación tipo de control de emisiones a la atmósfera suele estar integrada por:
 - ❖ Un dispositivo de captación
 - ❖ Un sistema de conductos
 - ❖ Un sistema de depuración o control
 - ❖ Un sistema de impulsión de aire (un extractor)
 - ❖ Un sistema de evacuación de los gases residuales
- Debe tenderse a ubicar el dispositivo de aspiración lo más próximo posible a la fuente emisora, abarcando la máxima área posible de generación del contaminante

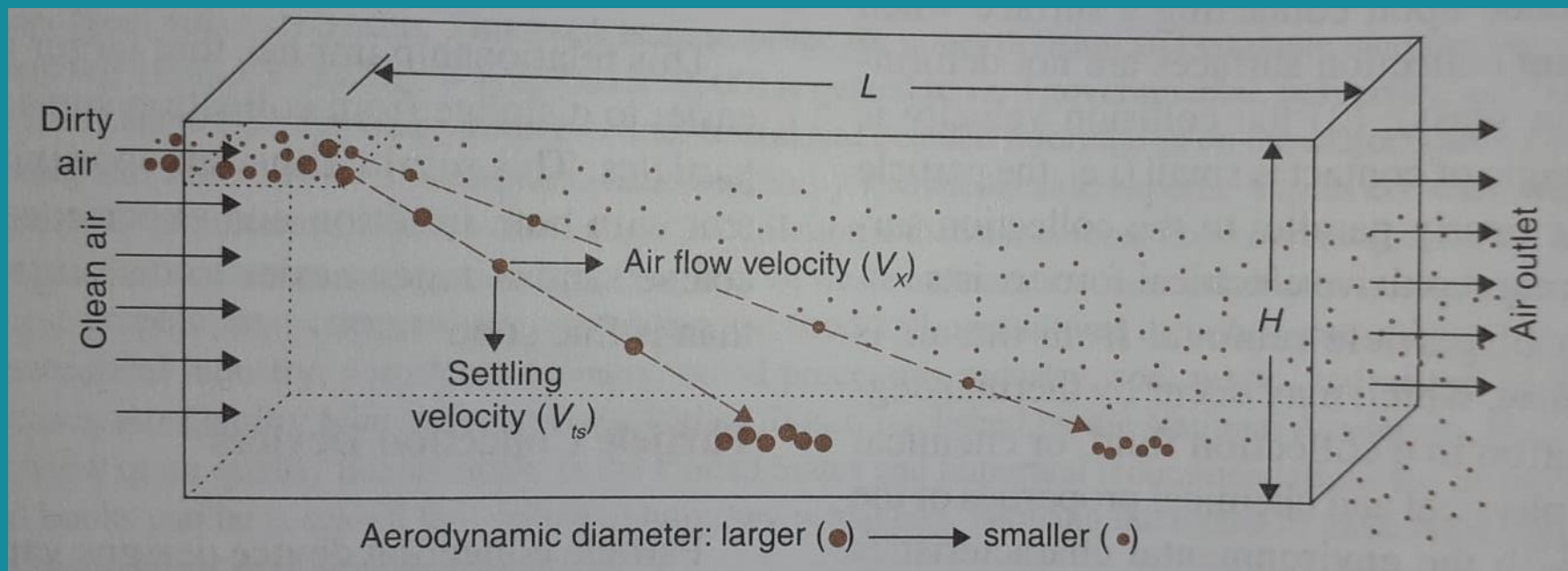


Control de emisiones de descarga de camión en empresa
Dambo

Tecnologías de control de emisiones de partículas

- Sedimentadores:

- ❖ Se utilizan únicamente para remover partículas de grandes diámetros
- ❖ Esto limita su utilización cuando se busca remover partículas finas (PM_{10} y/o $PM_{2,5}$)
- ❖ Se basan en la disminución de la velocidad del flujo



Tecnologías de control de emisiones de partículas

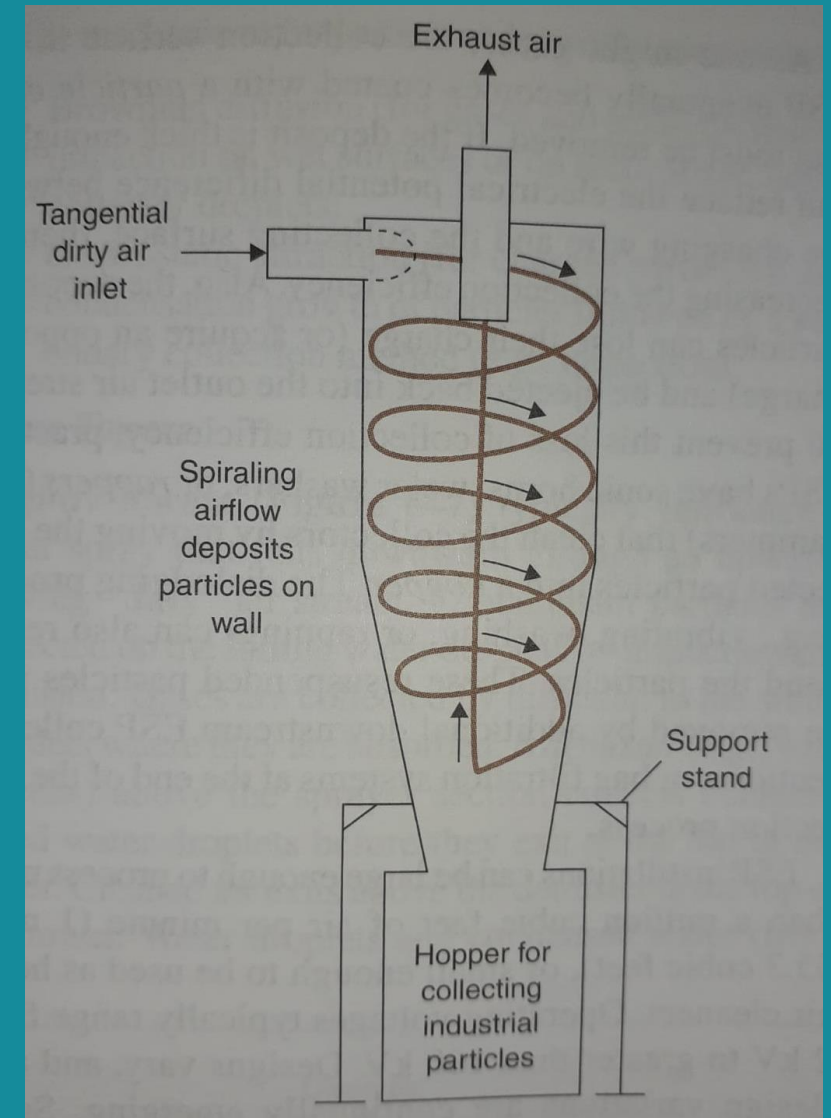
- Sedimentadores:

- ❖ La fracción de partículas más pequeña que logra sedimentar totalmente verifica la siguiente relación: $\Delta t_{HOR} = \Delta t_{VER} \rightarrow L/V_x = H/V_{ts} \rightarrow V_{ts} = H/L * V_x$
- ❖ La velocidad terminal de sedimentación (V_{ts}) es una característica propia de las partículas, y depende de su diámetro
- ❖ A modo de ejemplo, si $V_x = 1 \text{ m/s}$ y $H = 1 \text{ m}$, para remover partículas con diámetros mayores o iguales a $1 \mu\text{m}$ ($V_{ts} = 3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$), L deberá ser mayor o igual a 30000 m aproximadamente (inviabile)

Tecnologías de control de emisiones de partículas

- **Ciclones:**
 - ❖ Se utilizan para recolectar partículas más pequeñas que las que pueden ser removidas en un sedimentador
 - ❖ En estas unidades se produce una fuerza centrífuga que promueve la sedimentación de partículas en las paredes del ciclón:

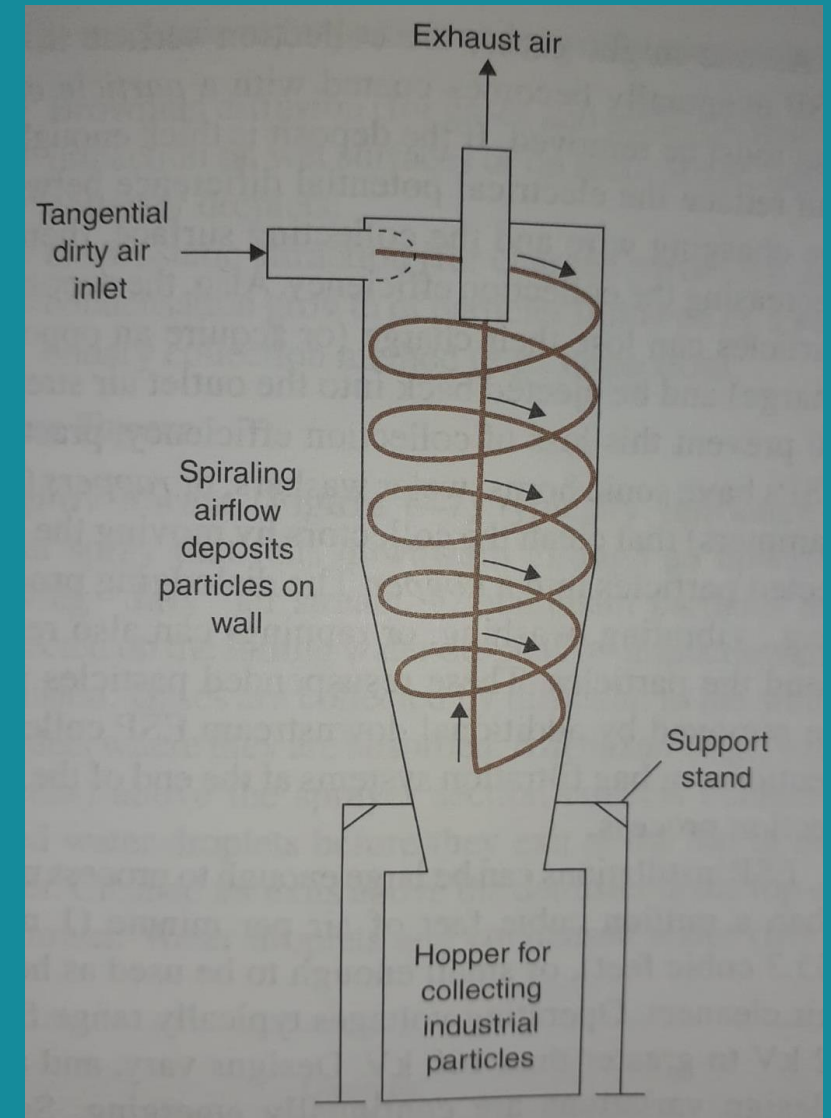
$F_c = m \cdot V_t^2 / R$; en donde m es la masa de la partícula, V_t es la velocidad tangencial y R es el radio del ciclón



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

Tecnologías de control de emisiones de partículas

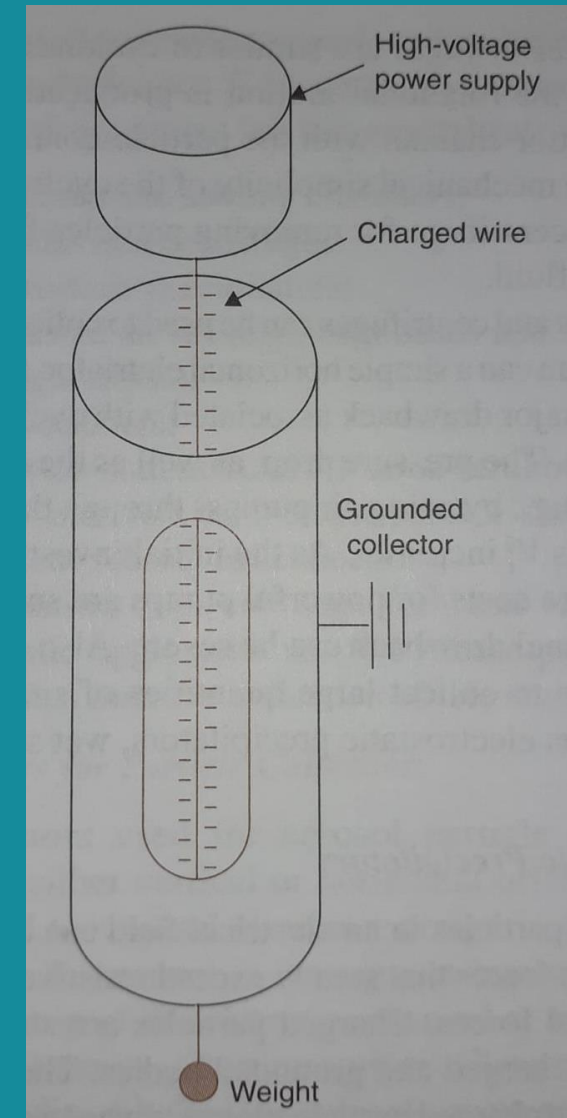
- Ciclonas:
- ❖ Para favorecer la remoción, se busca aumentar el valor del cociente entre F_c y el peso de las partículas $F_g = m \cdot g$
- ❖ Es decir, se busca aumentar el valor del cociente: $F_c/F_g = Vt^2/R \cdot g$
- ❖ Mayores valores de Vt requieren equipos de bombeo más potentes, lo que puede incrementar el costo de la instalación



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

Tecnologías de control de emisiones de partículas

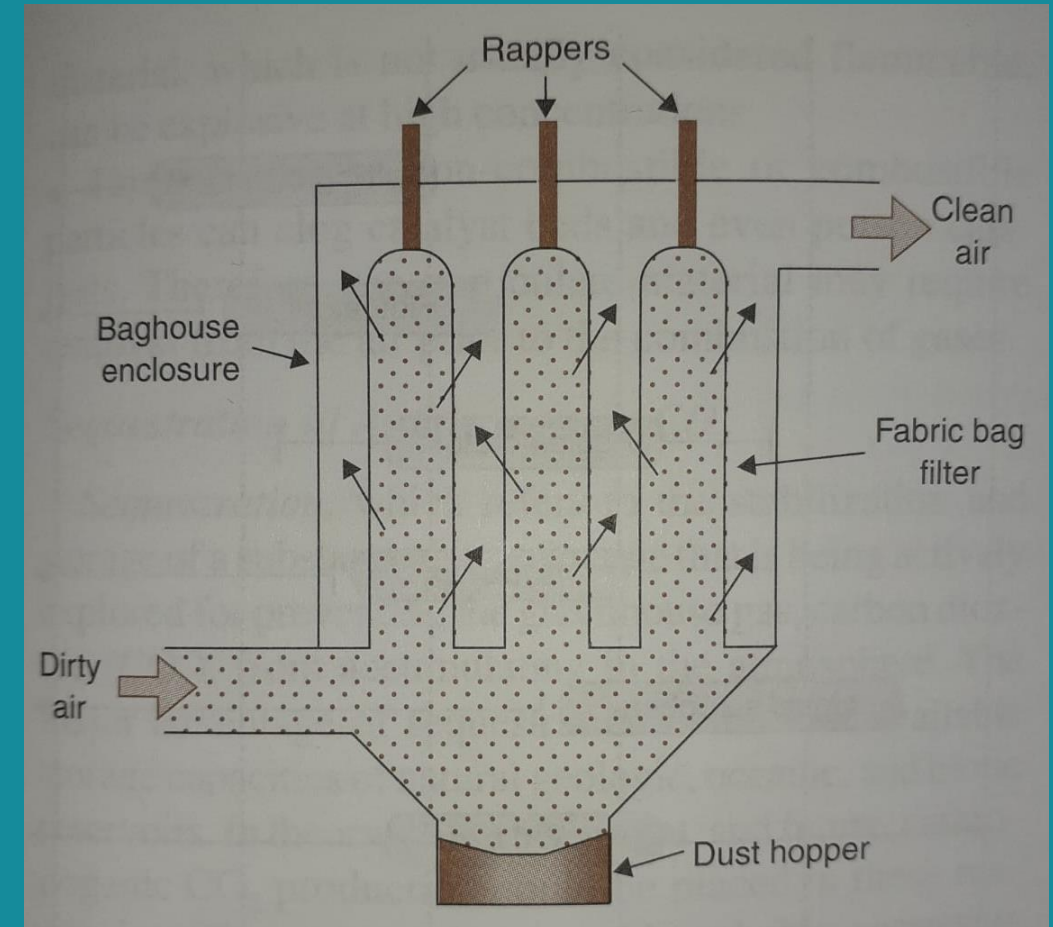
- Precipitadores electrostáticos:
 - ❖ Principio: movimiento de una partícula con carga eléctrica hacia una superficie colectora
 - ❖ Las partículas a ser removidas no pueden estar cargadas eléctricamente antes de comenzar el proceso de remoción
 - ❖ Este se compone de 3 pasos: 1) cargar eléctricamente a las partículas entrantes; 2) depositar las partículas en un colector; 3) limpiar el colector, removiendo las partículas depositadas
 - ❖ La eficiencia de estas unidades puede llegar al 99 %



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

Tecnologías de control de emisiones de partículas

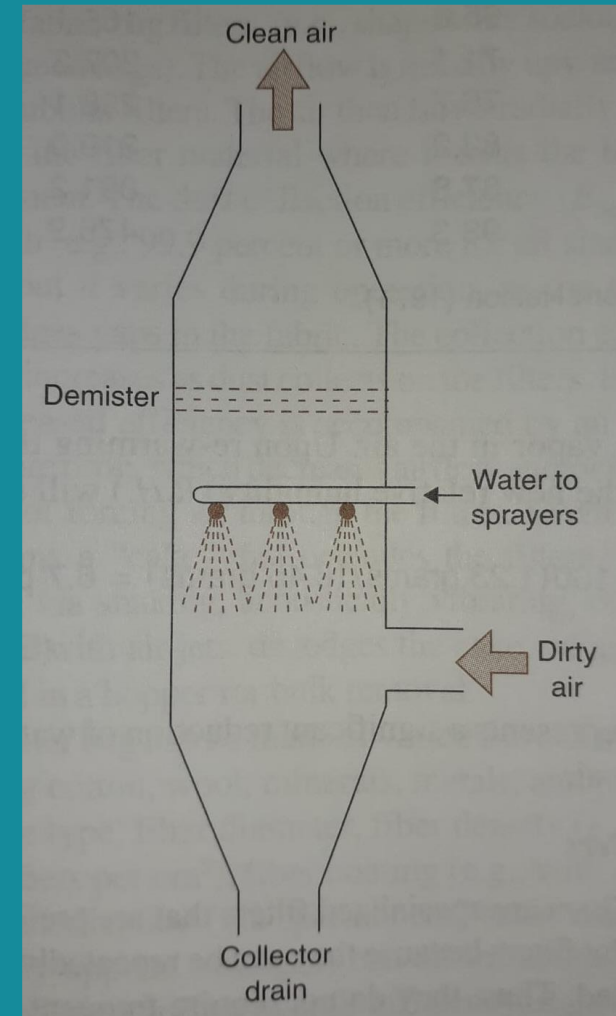
- Filtros de mangas:
- ❖ Presentan la ventaja de ser reutilizables
- ❖ La eficiencia de estas unidades puede llegar al 99,9 %
- ❖ Durante la operación, el filtro se va colmatando, incrementándose la eficiencia de remoción, pero también la pérdida de carga



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

Tecnologías de control de emisiones de partículas y gases

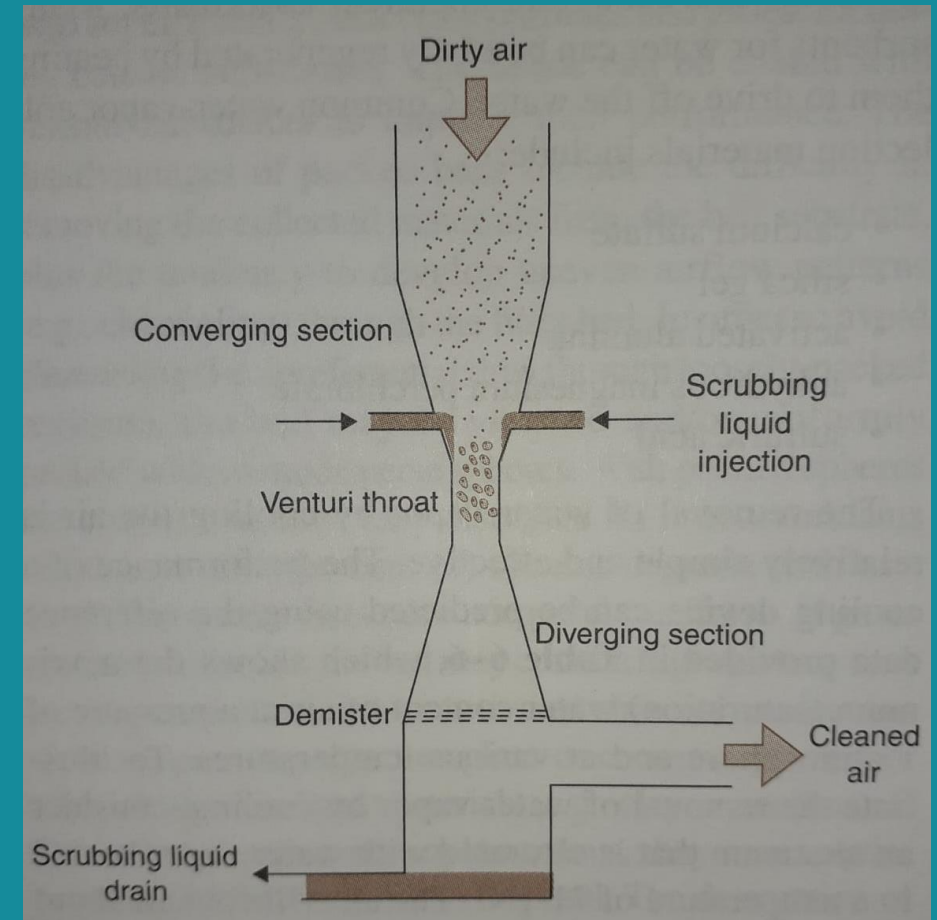
- **Depurador húmedo:**
 - ❖ En estas unidades, se utiliza un medio líquido para recolectar las partículas (o los gases), usualmente agua
 - ❖ Como desventaja, se genera un efluente líquido que debe tratarse
 - ❖ **Primer ejemplo: Spray Tower**



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

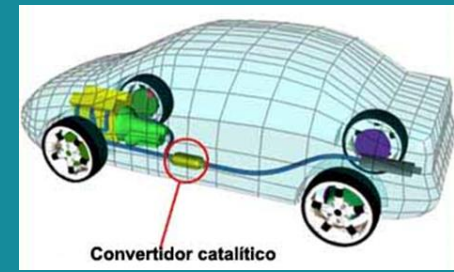
Tecnologías de control de emisiones de partículas y gases

- Depurador húmedo:
 - ❖ En estas unidades, se utiliza un medio líquido para recolectar las partículas (o los gases), usualmente agua
 - ❖ Como desventaja, se genera un efluente líquido que debe tratarse
 - ❖ Segundo ejemplo: Venturi Scrubber



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

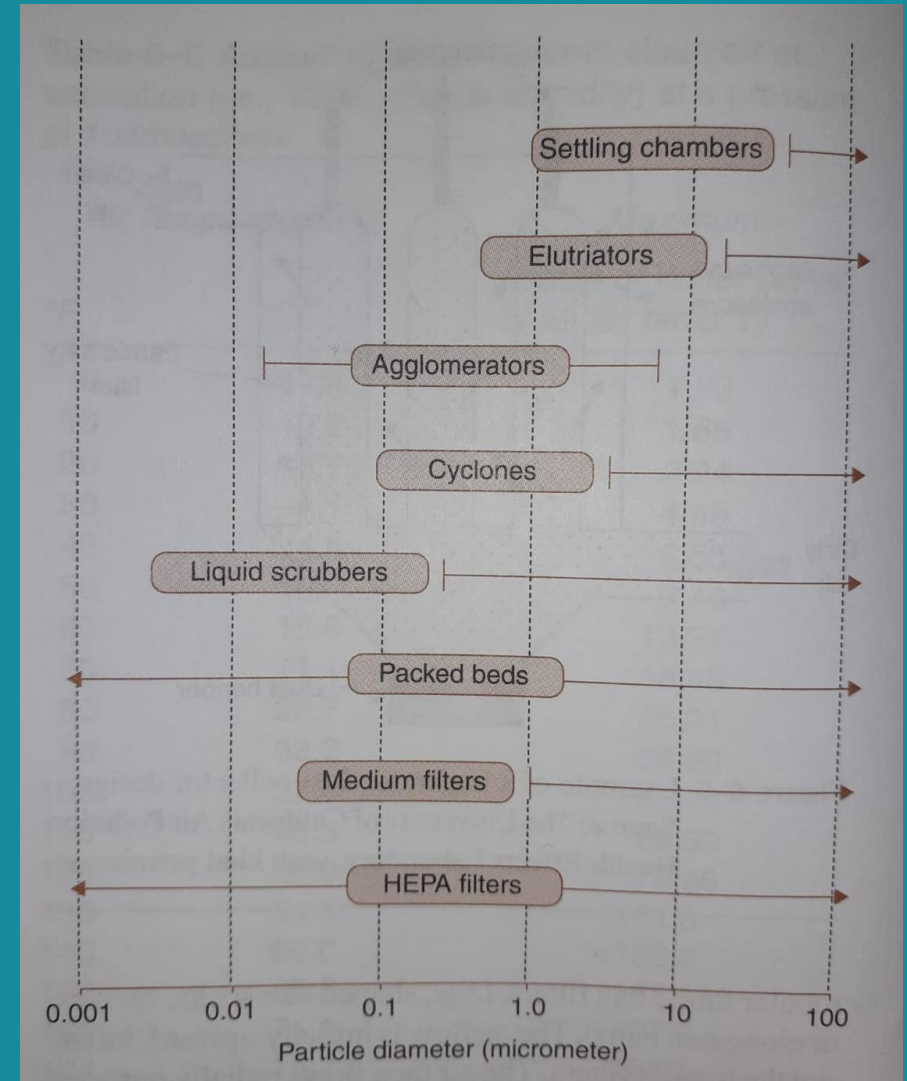
Tecnologías de control de emisiones de gases



- **Métodos de adsorción:**
 - ❖ Los gases son retenidos en la superficie de un material sólido con el que, por lo general, no reaccionan (ejemplo: filtros de carbón activado)
- **Convertidores catalíticos:**
 - ❖ Son filtros que contienen sustancias catalizadoras, que se operan a elevadas temperaturas (370 °C – 480 °C) o presiones (o ambas), de forma tal de favorecer la remoción de gases y partículas
 - ❖ Los convertidores catalíticos de los automóviles (catalizadores de tres vías) son dispositivos que incluyen un catalizador de reducción (platino y rodio) para convertir los NO_x en N_2 y O_2 ; y un catalizador de oxidación (platino y paladio) para convertir los hidrocarburos no quemados y el CO en CO_2 y vapor de agua

Comparación de tecnologías de control de emisiones

- La tecnología a elegir dependerá del contaminante que se busque remover (partículas, gases o ambos)
- En el caso de las partículas, también dependerá de su tamaño



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

Tecnología	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Sedimentadores y ciclones	Partículas grandes y medianas	Bajo costo, simplicidad, durabilidad	Baja eficiencia, alto requerimiento de espacio
Filtros	Partículas de todos los tamaños, humos	Alta eficiencia, bajos requerimientos de energía, residuo seco	Repuestos caros, limitaciones de temperatura y humedad
Depurador húmedo	Aire húmedo y caliente, todo tipo de partículas salvo las más pequeñas	Compactos, pérdida de carga constante, no genera polvo	Se genera un efluente líquido a tratar
Precipitadores electrostáticos	Todo tipo de partículas y nieblas	Alta eficiencia, baja pérdida de carga, residuo seco, bajos costos de mantenimiento	Alto requerimiento de espacio, alto costo inicial
Convertidores catalíticos	Gases y vapores	Bajo mantenimiento, baja pérdida de carga, alta eficiencia	Requiere altas temperaturas, las partículas pueden obstruirlo, alto costo

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

Contenido

- Introducción
- Guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS)
- Marco normativo nacional
- Índices de calidad del aire
- Guías de DINACEA
- Ejercicio

Ejercicio

- Estrategias de control de emisiones vehiculares en Montevideo:
 - ❖ Fuente de información: Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015
 - ❖ Se definen diferentes estrategias de control de emisiones vehiculares:

Escenario	Característica
Base	Estado actual
Transporte activo	Se reduce la flota de autos EURO 3 en un 30 %
Transporte eléctrico	Se reduce la flota de ómnibus EURO III en un 30 %
Modernización camiones	El 30 % de la flota de camiones EURO III pasa a EURO V

- ❖ Los escenarios alternativos se construyen con respecto al escenario Base
- ❖ A partir de la información proporcionada, calcular las emisiones totales de NO_x y de CO en ton/año para cada escenario, y comentar los resultados obtenidos