

# INTRODUCCIÓN AL MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

por NOVIER USCUCHAGUA

[linkedin.com/in/novvier](https://www.linkedin.com/in/novvier)

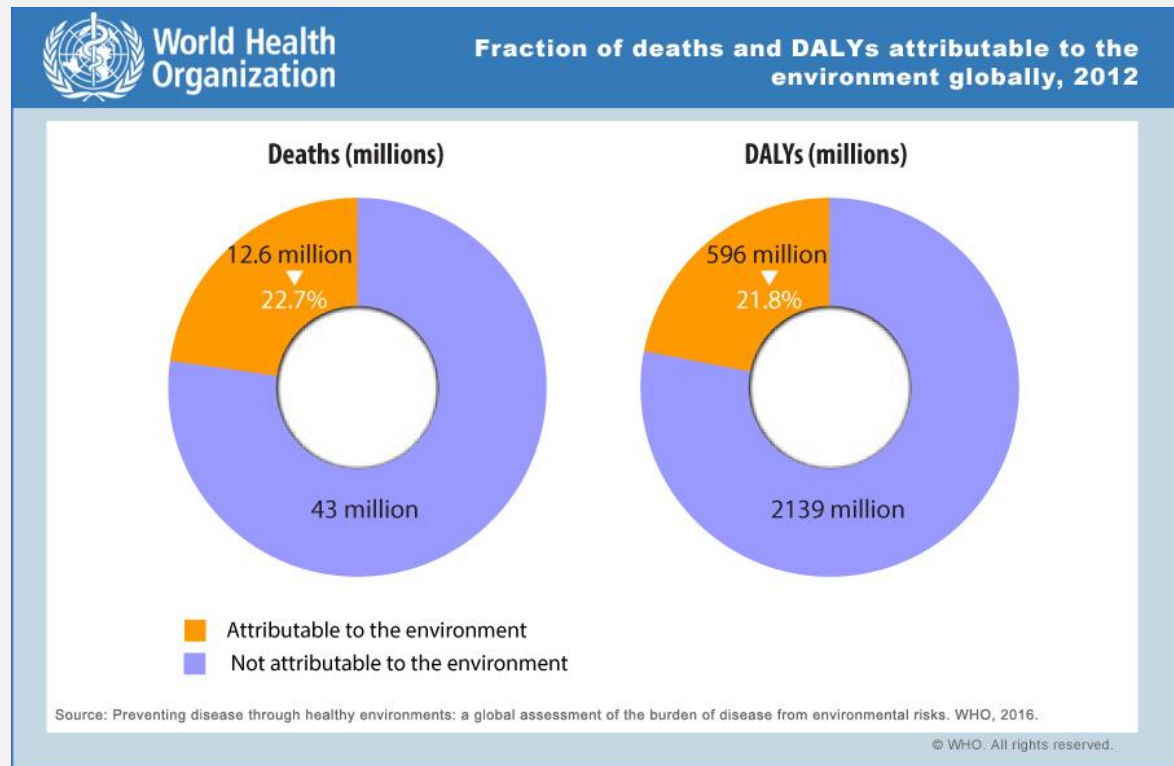
<https://github.com/novvier>

mayo de 2020

# Contaminación del aire

Es la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza. (D.S. N° 074-2001-PCM).

- **4.2 millones de muertes** cada año como resultado de la exposición a partículas finas
- La contaminación del aire es uno de los principales impulsores de la epidemia de enfermedades no transmisibles.
- La contaminación del aire acelera el cambio climático.
- Estudios recién muestran una relación entre la contaminación del aire y el incremento de casos de COVID-19



# Contaminación del aire

## • TIPOS DE CONTAMINANTES:

**Primarios:** Sustancias que son emitidas directamente a la atmósfera.

- PM, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ...

**Secundarios:** Sustancias que se forman a partir de procesos físicos y reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera.

- Smog, aerosoles, ozono troposférico, PM<sub>2.5</sub> secundario, sales, ...



Complejo Metalúrgico La Oroya (década '70), Archivo DRP.



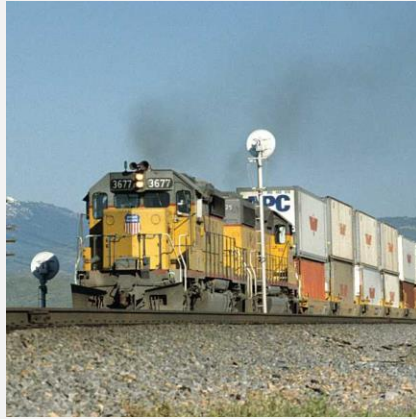
San Juan de Lurigancho, Lima (2016). Archivo Grupo RPP.

# Contaminación del aire

- Fuentes de contaminación



Puntual



Lineal



Área



Volumen



Flare



Lineal - Área



Lineal - Volumen



Open-Pit



# Contaminación del aire

Flotante



o

NO flotante



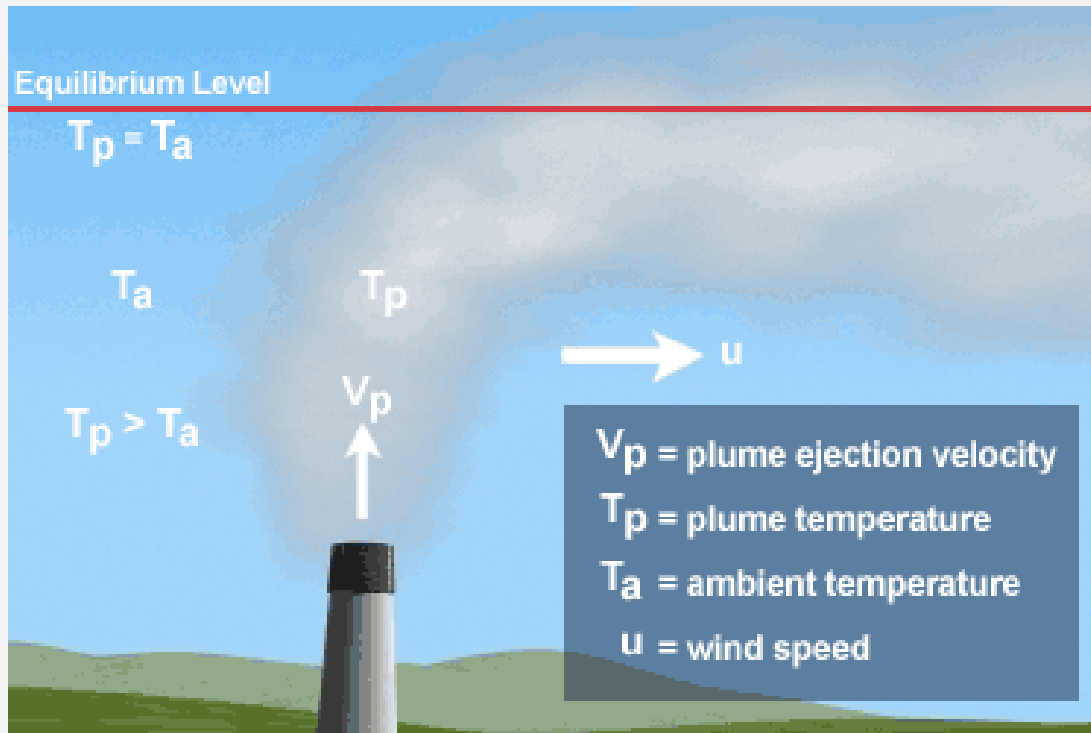
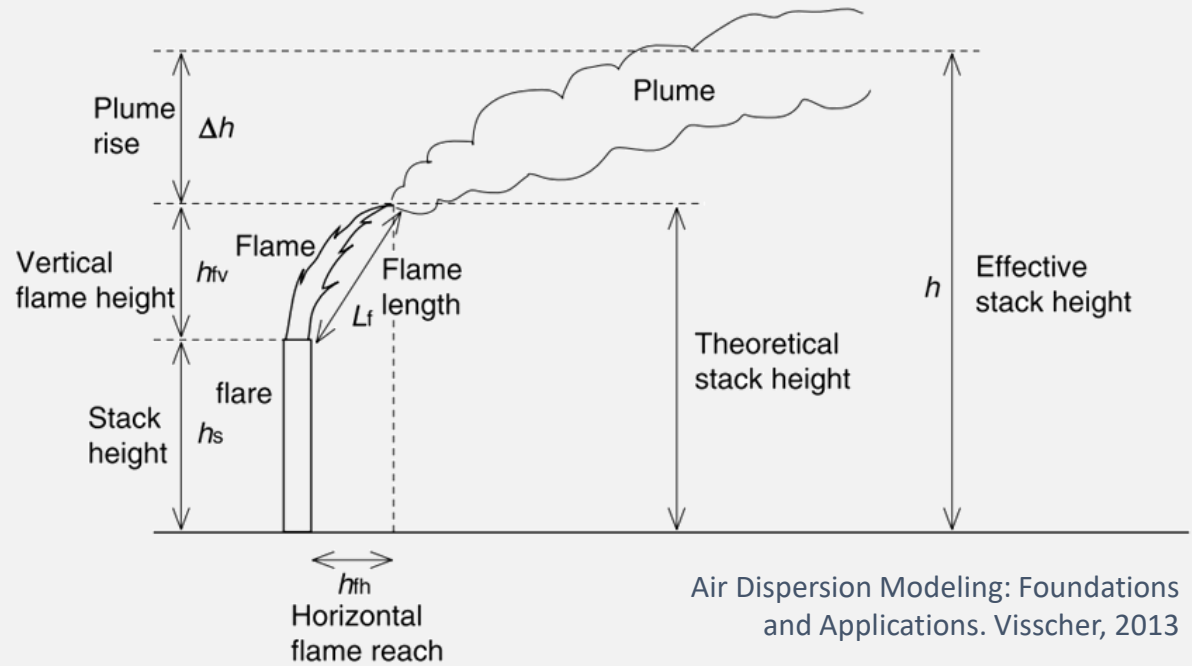
Área Flotante



Línea Flotante

# Contaminación del aire

Calculo de flotabilidad y elevación de la pluma.



# Contaminación del aire

## Cinética y Reacciones

- Formación de ozono troposférico:



- Formación de  $\text{PM}_{2.5}$  secundario (sulfatos, amonios, nitratos, ...)

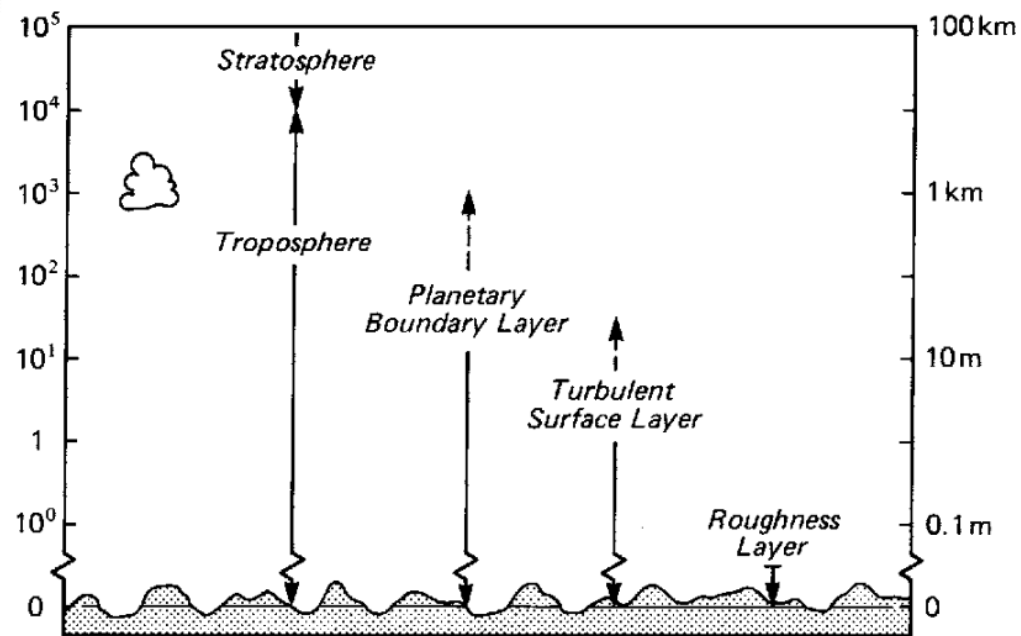
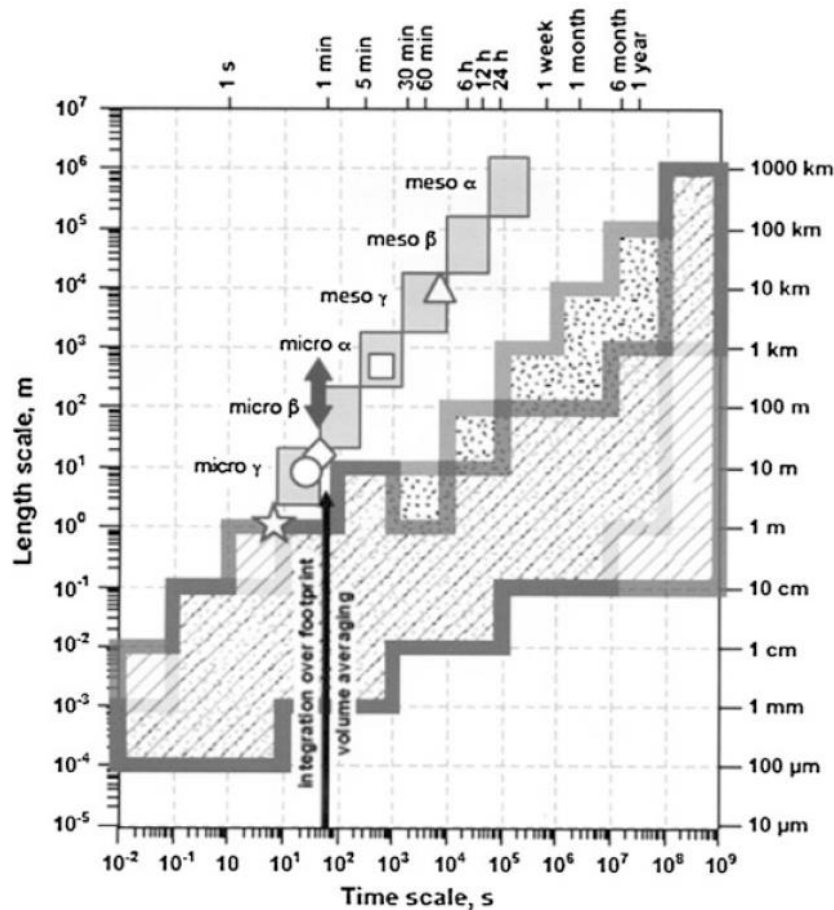


- Formación de  $\text{NO}_2$  a partir de  $\text{NO}_x$ 
  - Razón de  $\text{NO}_x/\text{NO}_2$ .
  - Limitación de ozono
  - En AERMODE: PVMRM y OLM



# Micrometeorología básica

## Escalas meteorológicas



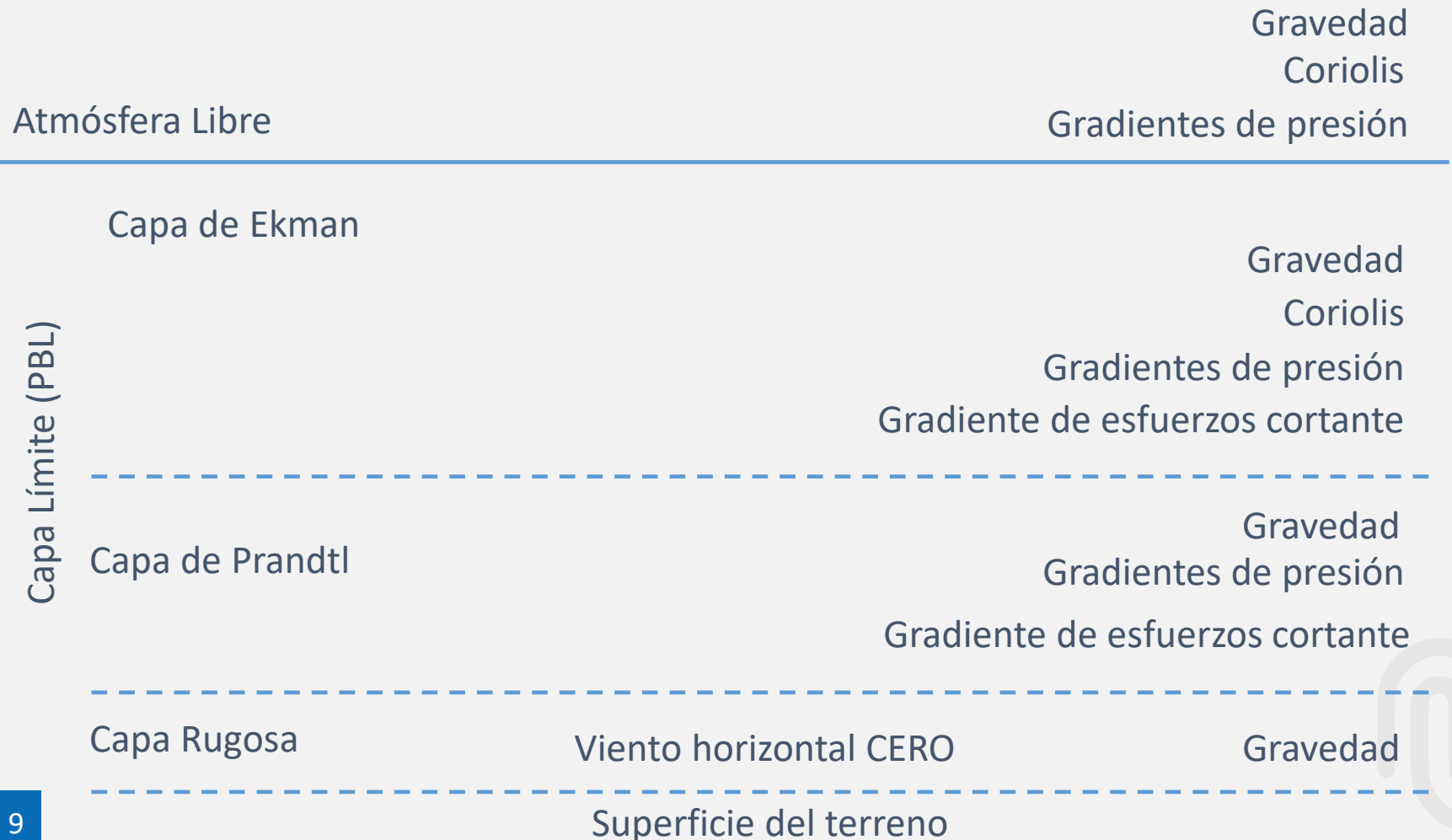
Boundary Layer Climates, Oke 1988

Micrometeorology. Foken, 2008



# Micrometeorología básica

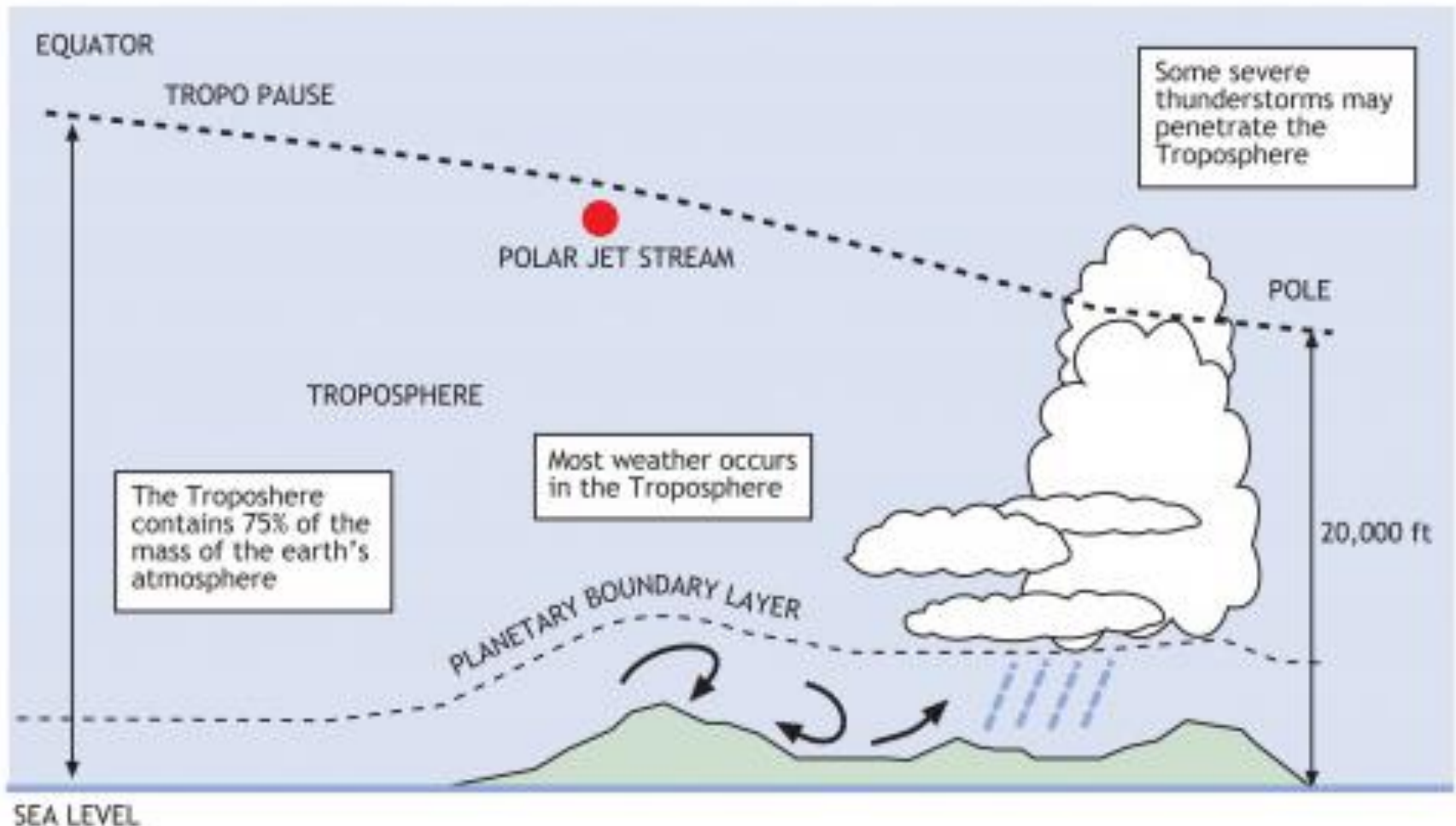
## Capas atmosféricas



# Micrometeorología básica

## Capa Límite Atmosférica (PBL)

Es la capa de la atmósfera que está influenciada por la superficie de la Tierra



# Micrometeorología básica

## Desarrollo de la PBL

### Procesos convectivos:

Predomina durante el día.

Producida principalmente por el calentamiento de la superficie.

(capa convectiva)

$$z_{ic}\theta\{z_{ic}\} - \int_0^{z_{ic}} \theta\{z\}dz = (1 + 2A) \int_0^t \frac{H\{t'\}}{\rho c_p} dt$$

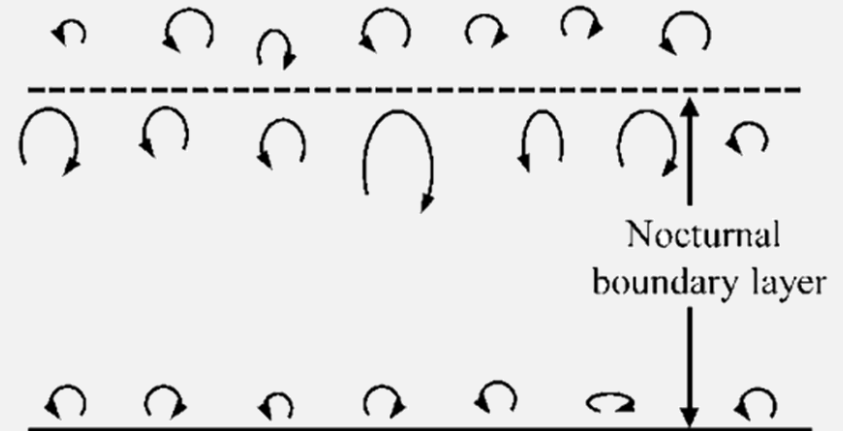
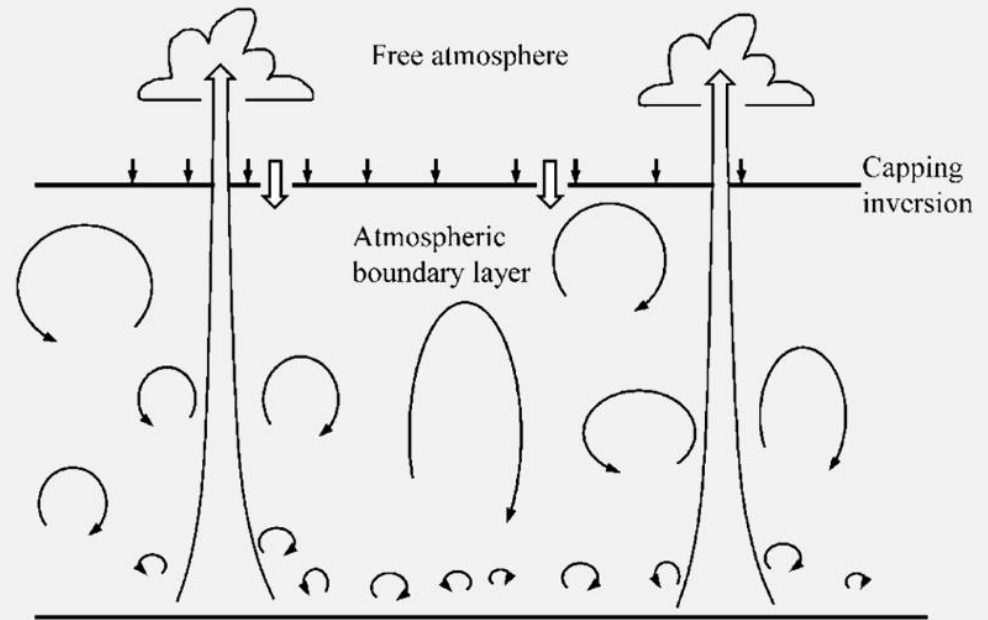
### Procesos mecánicos:

Predomina durante la noche.

Producida por:

- la rugosidad de la superficie, relacionada con la velocidad de fricción.
- la turbulencia generada por la cizalladura del viento en la cima.

$$z_{im}\{t + \Delta t\} = z_{im}\{t\}(e^{-\Delta t/\tau}) + z_{ie}\{t + \Delta t\}[1 - (e^{-\Delta t/\tau})]$$



# Micrometeorología básica

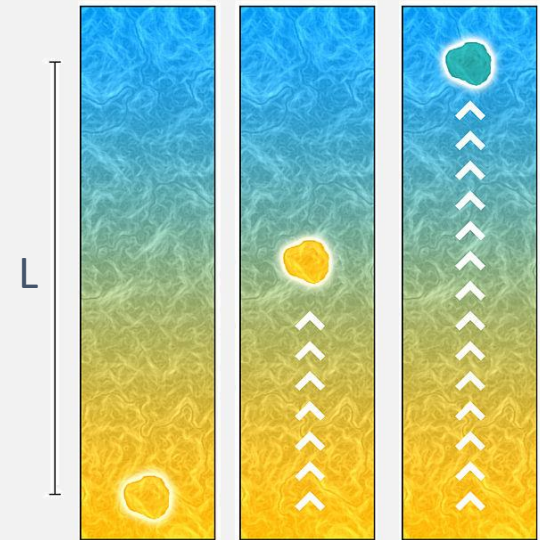
**La capa Superficial:** Es aquella región donde los flujos turbulentos varían en menos del 10% de su magnitud con la altura.

Para la parametrización de las escalas de turbulencia se utiliza la **teoría de longitud de mezcla (L)**: es un modelo bidimensional que intenta describir la transferencia de momento dentro de un flujo de fluido turbulento.

- Esta longitud viene a ser la distancia promedio que recorrerá una pequeña masa de fluido antes de intercambiar su momento con otra masa de fluido.

El método más usado es la **Longitud de Monin-Obukhov (L)**.

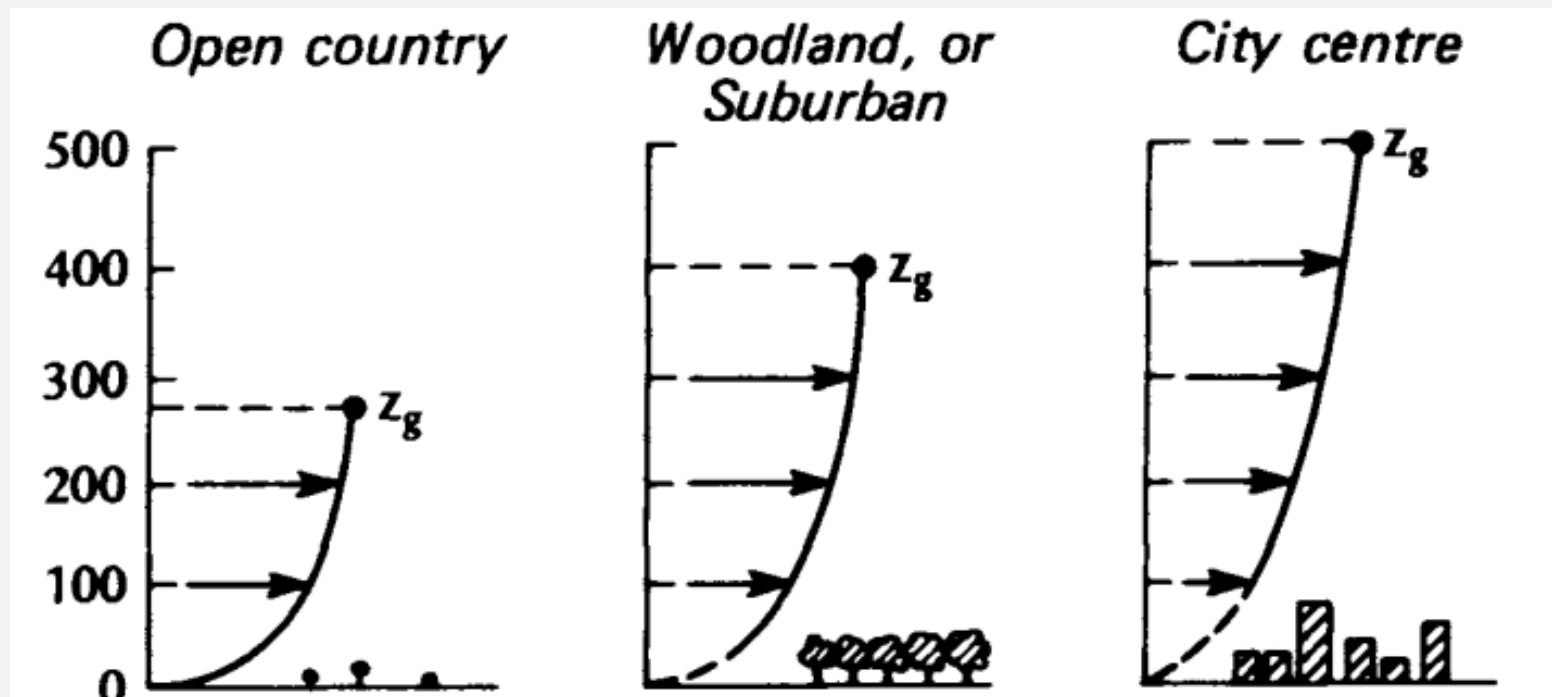
La escala de turbulencia cerca a la superficie esta limitada por la rugosidad.



Wiki

# Micrometeorología básica

**Rugosidad:** El campo de viento en la capa límite está controlado en gran medida por el arrastre de fricción impuesto sobre el flujo por la superficie rígida subyacente. El arrastre retrasa el movimiento cerca del suelo y da lugar a una fuerte disminución de la velocidad media del viento horizontal a medida que se acerca a la superficie.





# Micrometeorología básica

**Longitud de la rugosidad (L):** es equivalente a la altura a la que la velocidad del viento en teoría se convierte en cero.

**Table 6-6. Seasonal Values of Surface Roughness for the NLCD 2001-2016**

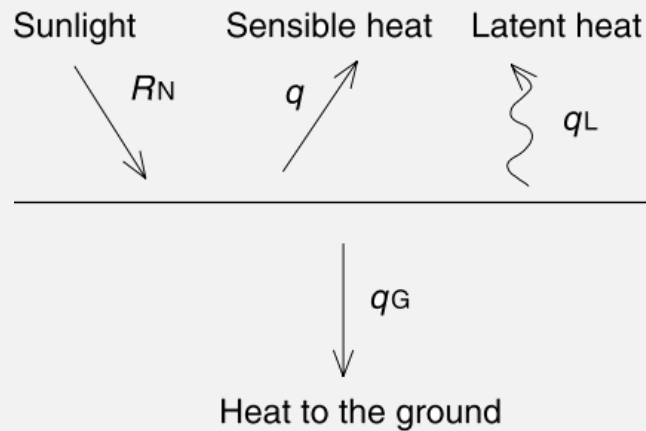
Class Number	Class Name	Seasonal Surface Roughness <sup>1</sup> (m)					Reference
		1	2	3	4	5	
11	Open Water	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	NLCD 1992 Cat. 11
12	Perennial Ice/Snow	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	NLCD 1992 Cat. 12
21	Developed, Open Space ( <i>Airport</i> )	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	Estimated <sup>2</sup>
	Developed, Open Space ( <i>Non-airport</i> )	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03	Estimated <sup>2</sup>
22	Developed, Low Intensity ( <i>Airport</i> )	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	Estimated <sup>2</sup>
	Developed, Low Intensity ( <i>Non-airport</i> )	0.07	0.05	0.09	0.1	0.09	Estimated <sup>2</sup>
23	Developed, Medium Intensity ( <i>Airport</i> )	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	Estimated <sup>2</sup>
	Developed, Medium Intensity ( <i>Non-airport</i> )	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	Estimated <sup>2</sup>
24	Developed, High Intensity ( <i>Airport</i> )	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	Estimated <sup>2</sup>
	Developed, High Intensity ( <i>Non-airport</i> )	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	Estimated <sup>2</sup>
31	Barren Land (Rock/Sand/Clay) ( <i>Arid Region</i> )	0.05	NA	0.05	0.05	0.05	NLCD 1992 Cat. 31
	Barren Land (Rock/Sand/Clay) ( <i>Non-arid Region</i> )	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	NLCD 1992 Cat. 31
32	Unconsolidated Shore	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	NLCD 1992 Cat. 31
41	Deciduous Forest	0.6	0.5	1.0	1.3	1.3	NLCD 1992 Cat. 41
42	Evergreen Forest	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	NLCD 1992 Cat. 42
43	Mixed Forest	0.9	0.8	1.1	1.3	1.3	NLCD 1992 Cat. 43

User's Guide for  
AERSURFACE Tool,  
EPA 2020



# Micrometeorología básica

**Razón de Bowen:** es la relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente. Usualmente 0 en aguas abiertas y 10 en desiertos.



Air Dispersion Modeling: Foundations and Applications. Visscher, 2013

Class Number	Class Name	Seasonal Bowen Ratio <sup>1</sup> Average					Seasonal Bowen Ratio <sup>1</sup> Wet					Seasonal Bowen Ratio <sup>1</sup> Dry				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
11	Open Water	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
12	Perennial Ice/Snow	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
21	Developed, Open Space	0.7	0.5	0.3	0.5	0.7	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
22	Developed, Low Intensity	1.0	0.5	0.8	0.8	1.0	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	2.5	0.5	2.0	2.0	2.5
23	Developed, Medium Intensity	1.2	0.5	1.1	1.1	1.2	0.8	0.5	0.8	0.8	0.8	3.0	0.5	3.0	3.0	3.0
24	Developed, High Intensity	1.5	0.5	1.5	1.5	1.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	3.0	0.5	3.0	3.0	3.0
31	Barren Land (Rock/Sand/Clay) (Arid Region)	6.0	NA	3.0	4.0	6.0	2.0	NA	1.0	1.5	2.0	10.0	NA	5.0	6.0	10.0
	Barren Land (Rock/Sand/Clay) (Non-arid Region)	1.5	0.5	1.5	1.5	1.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	3.0	0.5	3.0	3.0	3.0
32	Unconsolidated Shore	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2
41	Deciduous Forest	1.0	0.5	0.7	0.3	1.0	0.4	0.5	0.3	0.2	0.4	2.0	0.5	1.5	0.6	2.0
42	Evergreen Forest	0.8	0.7	0.3	0.3	0.8	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	1.5	0.5	1.5	0.6	1.5
43	Mixed Forest	0.9	0.5	0.7	0.3	0.9	0.35	0.5	0.3	0.2	0.35	1.75	0.5	1.5	0.6	1.75
51	Dwarf Scrub (Arid Region)	4.0	NA	2.0	3.0	4.0	1.5	NA	0.8	0.9	1.5	7.0	NA	4.0	6.0	7.0
	Dwarf Scrub (Non-arid Region)	1.5	0.5	1.0	1.0	1.5	1.0	0.5	0.8	0.8	1.0	3.0	0.5	2.5	2.5	3.0
52	Shrub/Scrub (Arid Region)	6.0	NA	3.0	4.0	6.0	2.0	NA	1.0	1.5	2.0	10.0	NA	5.0	6.0	10.0
	Shrub/Scrub (Non-arid Region)	1.5	0.5	1.0	1.0	1.5	1.0	0.5	0.8	0.8	1.0	3.0	0.5	2.5	2.5	3.0
71	Grasslands/Herbaceous	1.0	0.5	0.4	0.8	1.0	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	2.0	0.5	1.0	2.0	2.0

User's Guide for AERSURFACE Tool, EPA 2020

# Micrometeorología básica

**Albedo:** Es la relación entre la radiación reflejada y la radiación entrante.

**Table 6-4. Seasonal Values of Albedo for the NLCD 2001-2016**

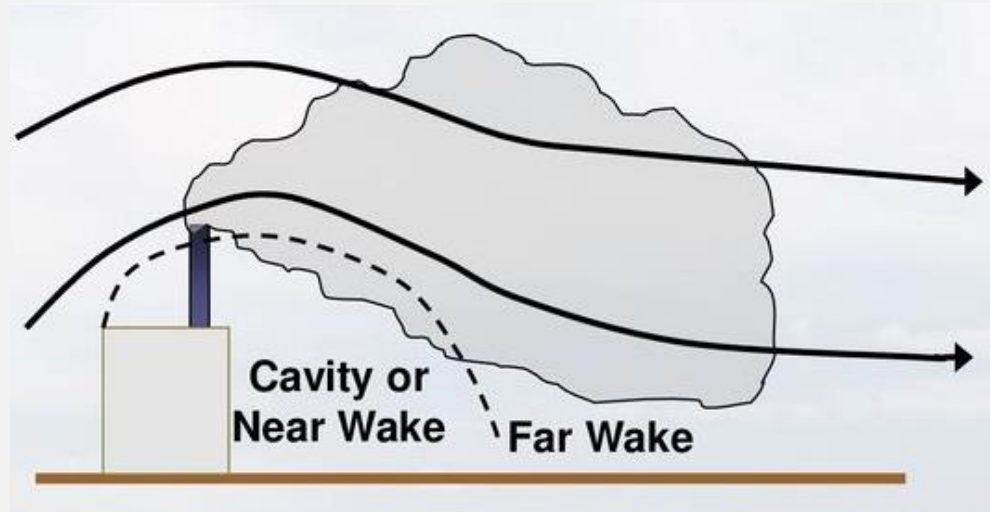
Class Number	Class Name	Seasonal Albedo Values <sup>1</sup>					Reference
		1	2	3	4	5	
11	Open Water	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	NLCD 1992 Cat. 11
12	Perennial Ice/Snow	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	NLCD 1992 Cat.12
21	Developed, Open Space	0.18	0.6	0.15	0.15	0.15	NLCD 1992 Cat. 85
22	Developed, Low Intensity	0.18	0.45	0.16	0.16	0.16	NLCD 1992 Cat. 21
23	Developed, Medium Intensity	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 23
24	Developed, High Intensity	0.18	0.25	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 23
31	Barren Land (Rock/Sand/Clay) ( <i>Arid Region</i> )	0.2	NA	0.2	0.2	0.2	NLCD 1992 Cat. 31
	Barren Land (Rock/Sand/Clay) ( <i>Non-arid Region</i> )	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	NLCD 1992 Cat. 31
32	Unconsolidated Shore	0.14	0.3	0.14	0.14	0.14	NLCD 1992 Cat. 91
41	Deciduous Forest	0.17	0.5	0.16	0.16	0.16	NLCD 1992 Cat. 41
42	Evergreen Forest	0.12	0.35	0.12	0.12	0.12	NLCD 1992 Cat. 42
43	Mixed Forest	0.14	0.42	0.14	0.14	0.14	NLCD 1992 Cat. 43
51	Dwarf Scrub ( <i>Arid Region</i> )	0.25	NA	0.25	0.25	0.25	NLCD 1992 Cat. 51
	Dwarf Scrub ( <i>Non-arid Region</i> )	0.18	0.5	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 51
52	Shrub/Scrub ( <i>Arid Region</i> )	0.25	NA	0.25	0.25	0.25	NLCD 1992 Cat. 51
	Shrub/Scrub ( <i>Non-arid Region</i> )	0.18	0.5	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 51
71	Grasslands/Herbaceous	0.2	0.6	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 71
72	Sedge/Herbaceous	0.2	0.6	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 71
73	Lichens	0.2	0.6	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 71
74	Moss	0.2	0.6	0.18	0.18	0.18	NLCD 1992 Cat. 71
81	Pasture/Hay	0.18	0.6	0.14	0.2	0.2	NLCD 1992 Cat. 81
82	Cultivated Crops	0.18	0.6	0.14	0.2	0.2	NLCD 1992 Cat. 82
90	Woody Wetlands	0.14	0.3	0.14	0.14	0.14	NLCD 1992 Cat. 91

# Micrometeorología básica

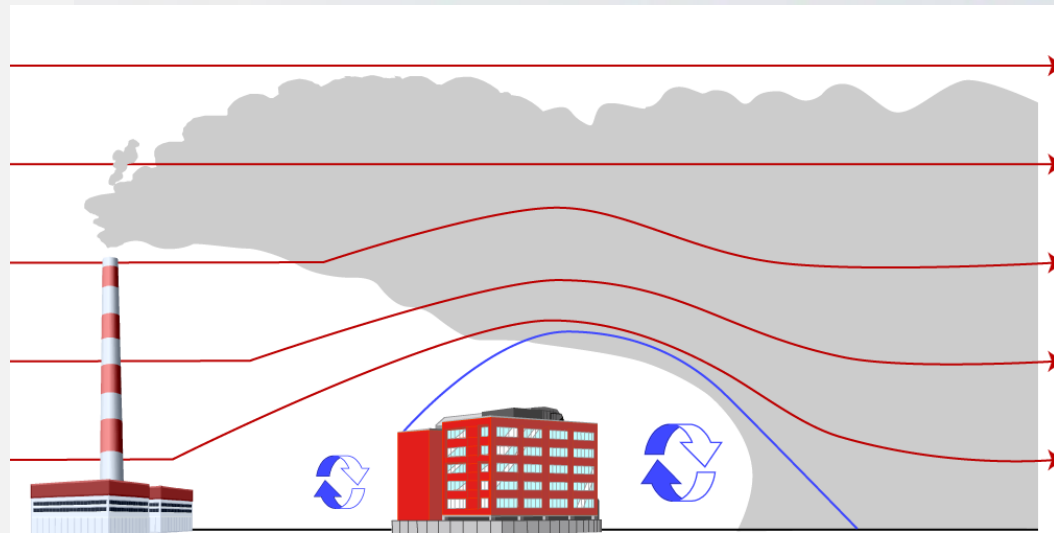
Principales efectos a considerad de la meteorología en la dispersión de contaminantes:

- ARRASTRE POR EDIFICIOS

- Estructura que soporta a la fuentes.



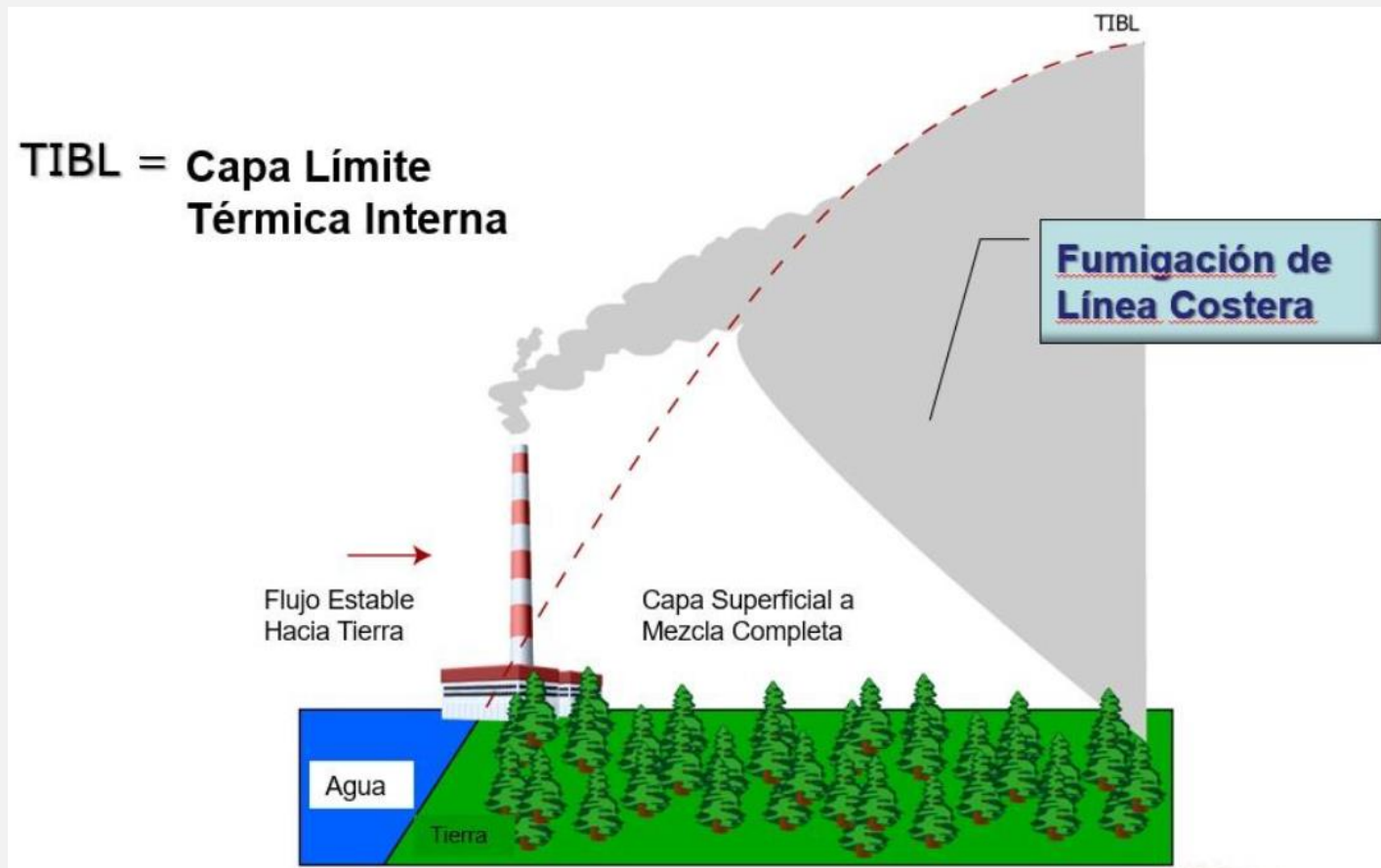
- Estructura alejada de la fuente.



# Micrometeorología básica

Principales efectos a considerad de la meteorología en la dispersión de contaminantes:

- FUMIGACIÓN COSTERA





# Inventario de Emisiones

## Método para el cálculo de emisiones:

- Muestreo o medición directa,
- Balance de masa,
- Análisis de combustible u otros cálculos de ingeniería y
- **Factores de emisión.**

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

**E** = Tasa de emisión de partículas (Mg/año o g/s).

**A** = Factor de emisión (g/s o g/s.m<sup>2</sup>).

**EF** = Intensidad de la actividad. Sus unidades pueden estar medidas en área, longitud, volumen u otra unidad relacionada con la actividad emisora.

**ER** = Eficiencia general de reducción de emisiones (%).

# Inventario de Emisiones

## Compilación de factores de emisión

- AP-42. EPA (Actualizándose constantemente), Volumen I
- Guía para el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC)
- Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. 2005. México.
- Emission Inventory, Mojave Desert Air Quality Management District, fleet average emission factors. 2013.
- ...
- Investigaciones específicas.

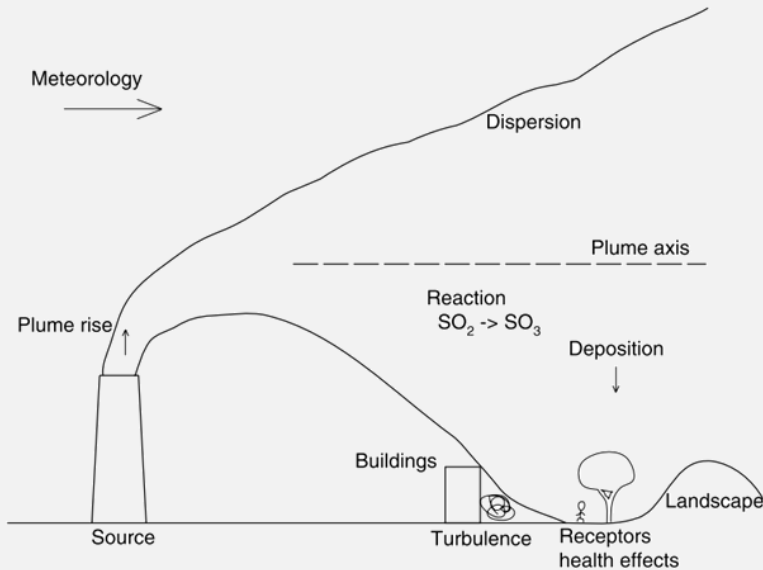
## Modelos/herramientas para la estimación de emisiones:

- MOVES (transporte)
- IVE (transporte)
- Landgem (rellenos sanitarios)

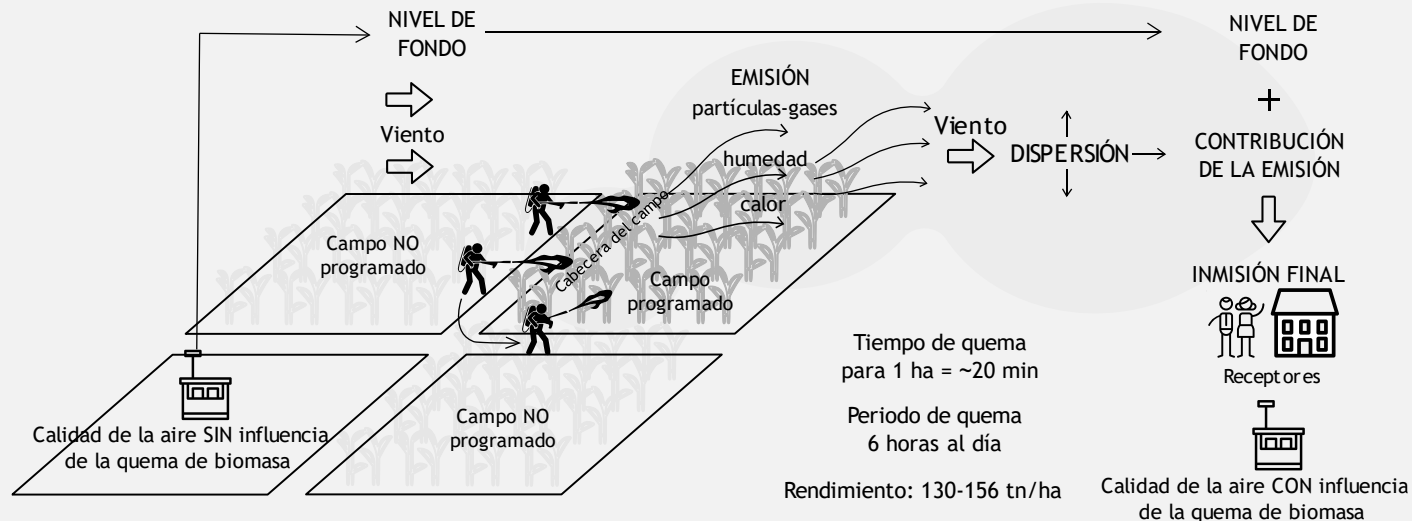
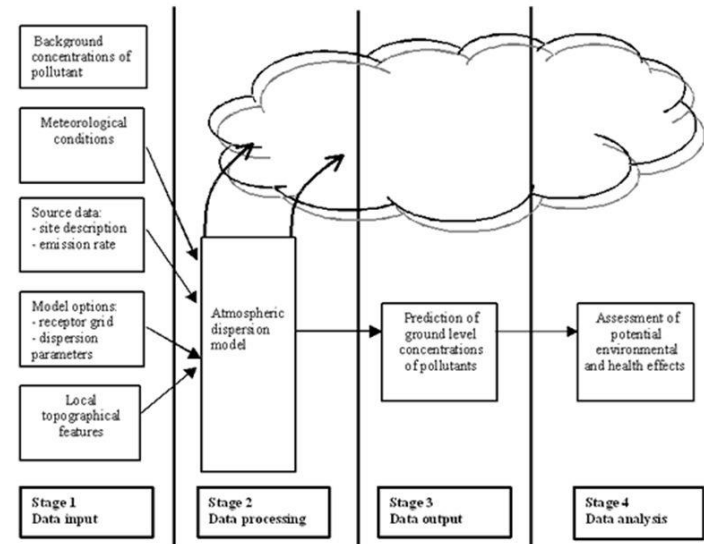


# Modelamiento numérico

## Modelo conceptual



## Main concepts in air quality modeling

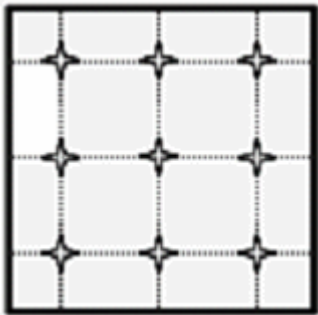


# Modelamiento numérico

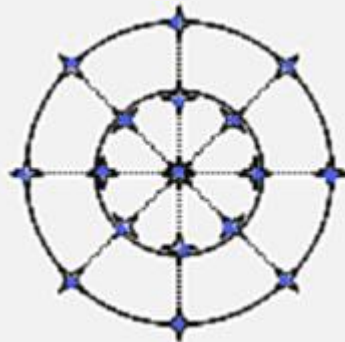
## Receptores (muestreo)

- Grilla continua

Malla de puntos que permite (mediante interpolación) determinar las isopletas de concentración.



Rectangular



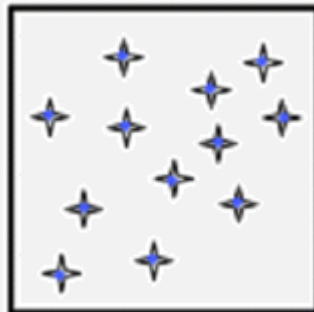
Polar

- Grilla discreta

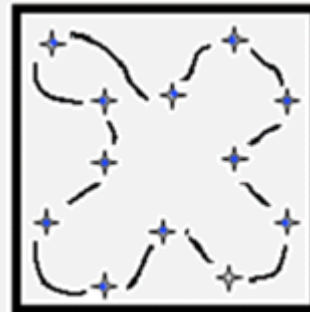
Puntos que corresponden a zonas de interés especial, como colegios, hospitales, zonas recreativas, puntos de monitoreo, etc.

**IMPORTANTE.** La concentración en una zona de interés NO debe ser determinada en base a la interpolación de una grilla continua.

- Otros tipos de grillas (investigación)



Aleatoria



Especial



# Modelamiento numérico

## Selección del modelo

Criterio		Condiciones a evaluar
Meteorológicos y climáticos		<ul style="list-style-type: none"><li>- Interacción costera</li><li>- Variabilidad climática</li><li>- Condiciones extremas</li></ul>
Geográfico (dimensionalidad)		<ul style="list-style-type: none"><li>- Alcance espacial</li><li>- Topografía</li><li>- Uso de suelo (urbano, rural)</li><li>- Ubicación de los receptores</li></ul>
Emisión	Tipo de fuente	<ul style="list-style-type: none"><li>- Puntual, línea, área, volumen, flare, ...</li><li>- Flotante o no flotante</li></ul>
	Tipo de contaminante	<ul style="list-style-type: none"><li>- Primario o secundario</li><li>- Formación del contaminante secundario</li></ul>
Factores computación		<ul style="list-style-type: none"><li>- Detalle de la grilla continua</li><li>- Tiempo de procesamiento</li></ul>
Documentación del modelo		<ul style="list-style-type: none"><li>- Normas y guías</li><li>- Reproductibilidad</li></ul>



# Modelamiento numérico

## Tipos de modelos

Tipo	Características principales	Modelos
Determinísticos	<ul style="list-style-type: none"><li>- Son de estado no estacionario</li><li>- Consideran diversos enfoques del movimiento de un fluido.</li><li>- A mayor temporalidad y espacio, menor precisión.</li><li>- Requiere condiciones iniciales.</li><li>- Utilizado para evaluar emisiones accidentales.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- CFD (OpenFoam)</li><li>- Eulerianos (WRF-Chem, CAMx y CMAQ).</li><li>- Langragianos (AUSTAL)</li></ul>
Probabilísticos	<ul style="list-style-type: none"><li>- Son de estado estacionario.</li><li>- Requieren de gran registros de información meteorológica.</li><li>- Sus resultados son promedios.</li><li>- Consideran aleatoriedad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Gaussianos (AERMOD, VSMOKE, AEDT)</li><li>- Serie de tiempos</li><li>- Montecarlo (GOLDSIM)</li></ul>
Compuestos	Modelos que combinan diferentes técnicas para acelerar el procesamiento.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Tipo Puff (CALPUFF)</li><li>- Langragiano-gaussiano (LAPMOD)</li><li>- Langragiano-trayectoria (HYSPLIT)</li></ul>
Aprendizaje autónomo	Utilizan técnicas de la inteligencia artificial.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Maching Learning</li><li>- Deep Learning</li></ul>

# Modelamiento numérico

## Requerimiento regulatorio

En Perú:

- No se cuenta con una norma/guía general sobre modelamiento de calidad de aire.
- Guía para la evaluación de impactos en la calidad del aire por actividades minero metalúrgicas (2007). “Los modelos de Lagrange, como por ejemplo el CALPUFF, son aceptables y preferibles para las condiciones de topografía compleja en el Perú.”

En Latinoamérica:

- Chile: Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA (2012)

Estados Unidos:

- Appendix W to Part 51 (Title 40 CFR, Chapter I, Subchapter C). Guideline on Air Quality Models (2017)

Europa:

- Reino Unido: <https://www.gov.uk/guidance/environmental-permitting-air-dispersion-modelling-reports>
- UE: Guidance on the use of models for the European Air Quality Directive (FAIRMODE, 2010)

# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Ecuación gaussiana de dispersión

$$c = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right]$$

$c$  = concentración en un punto determina  $(x, y, z)$

$Q$  = tasa de emisión

$u$  = velocidad del viento en el eje del penacho

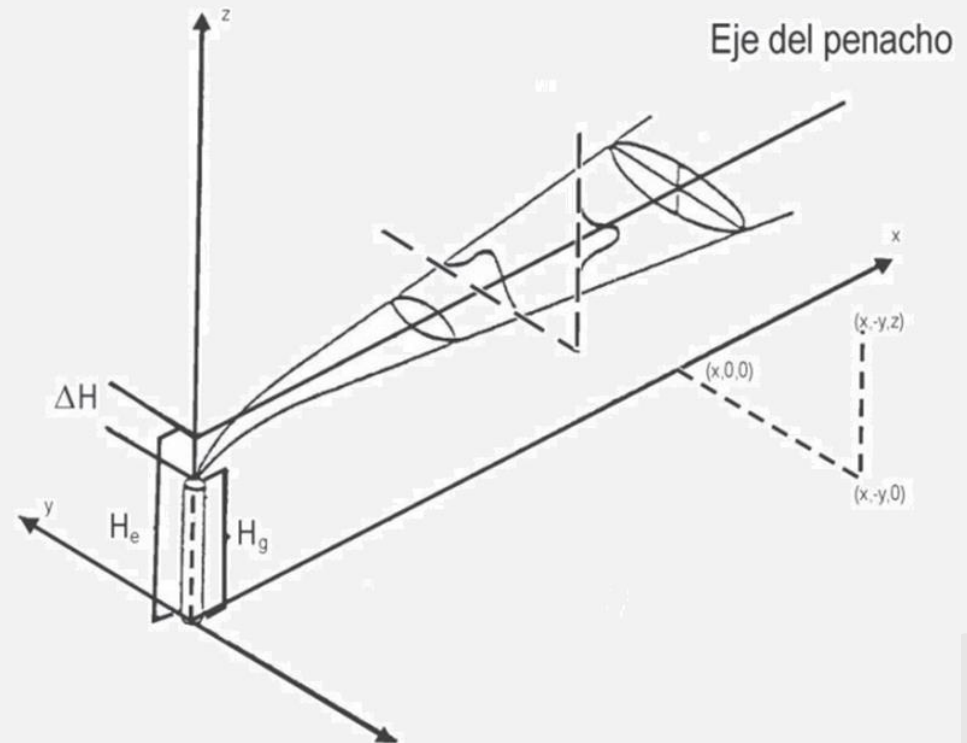
$\sigma_y$  = parámetro de dispersión horizontal o lateral

$\sigma_z$  = parámetro de dispersión vertical

$h$  = altura efectiva de la emisión

$y$  = distancia lateral desde el eje del penacho

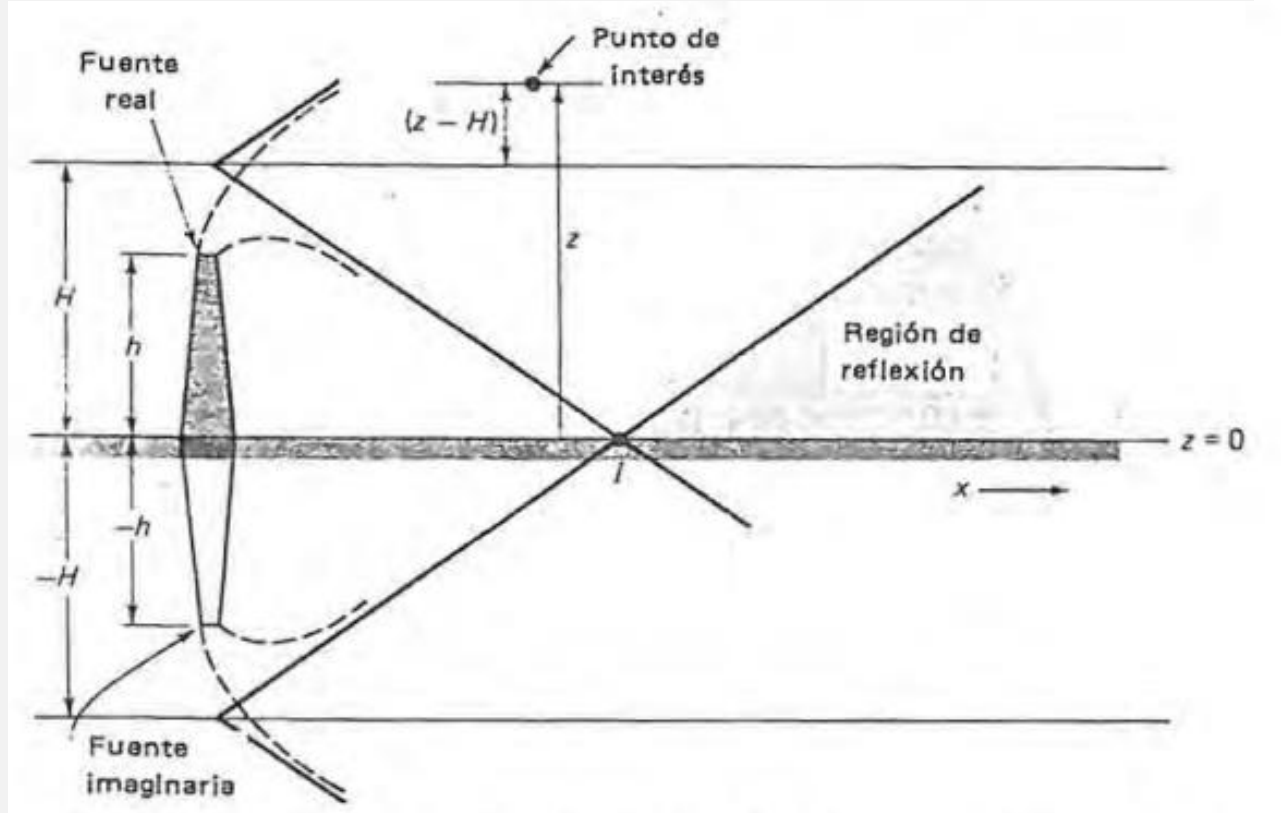
$z$  = distancia vertical desde el eje del penacho



# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Reflexión de la superficie

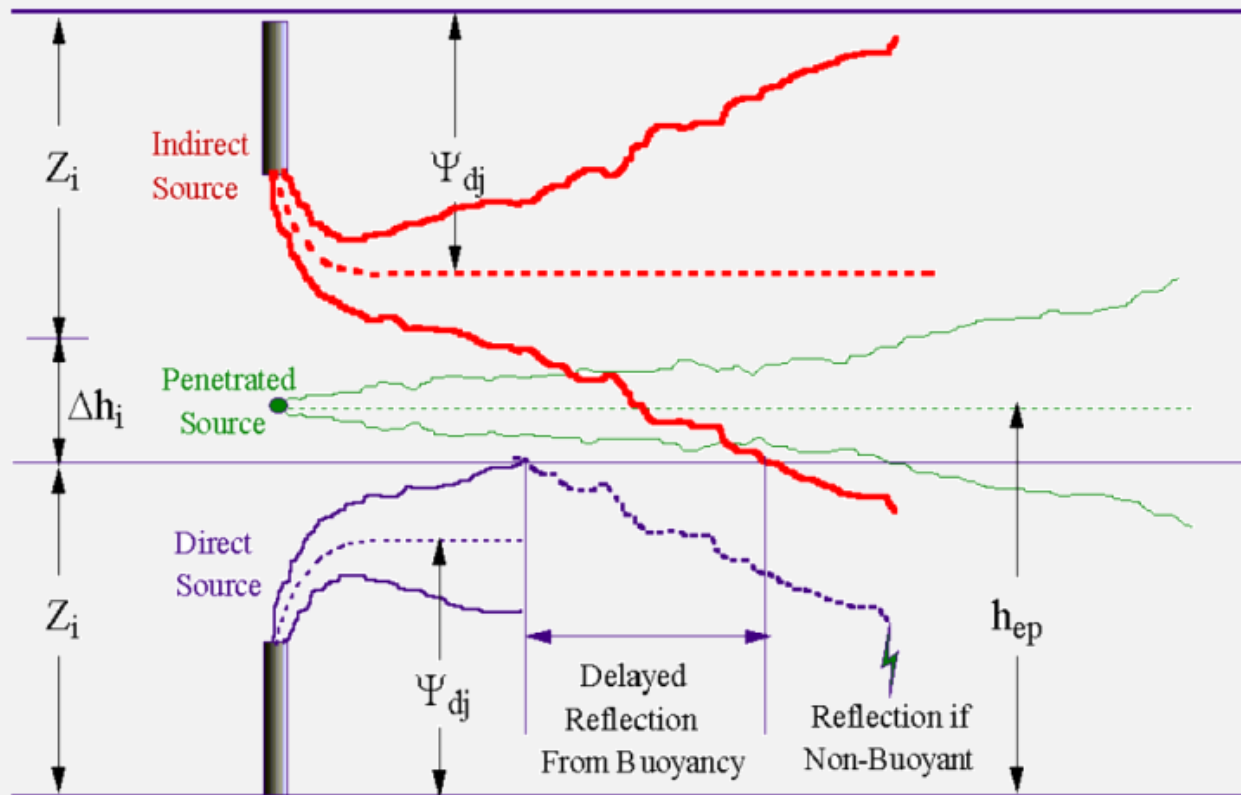
$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\}$$



# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Reflexión de la Capa Límite

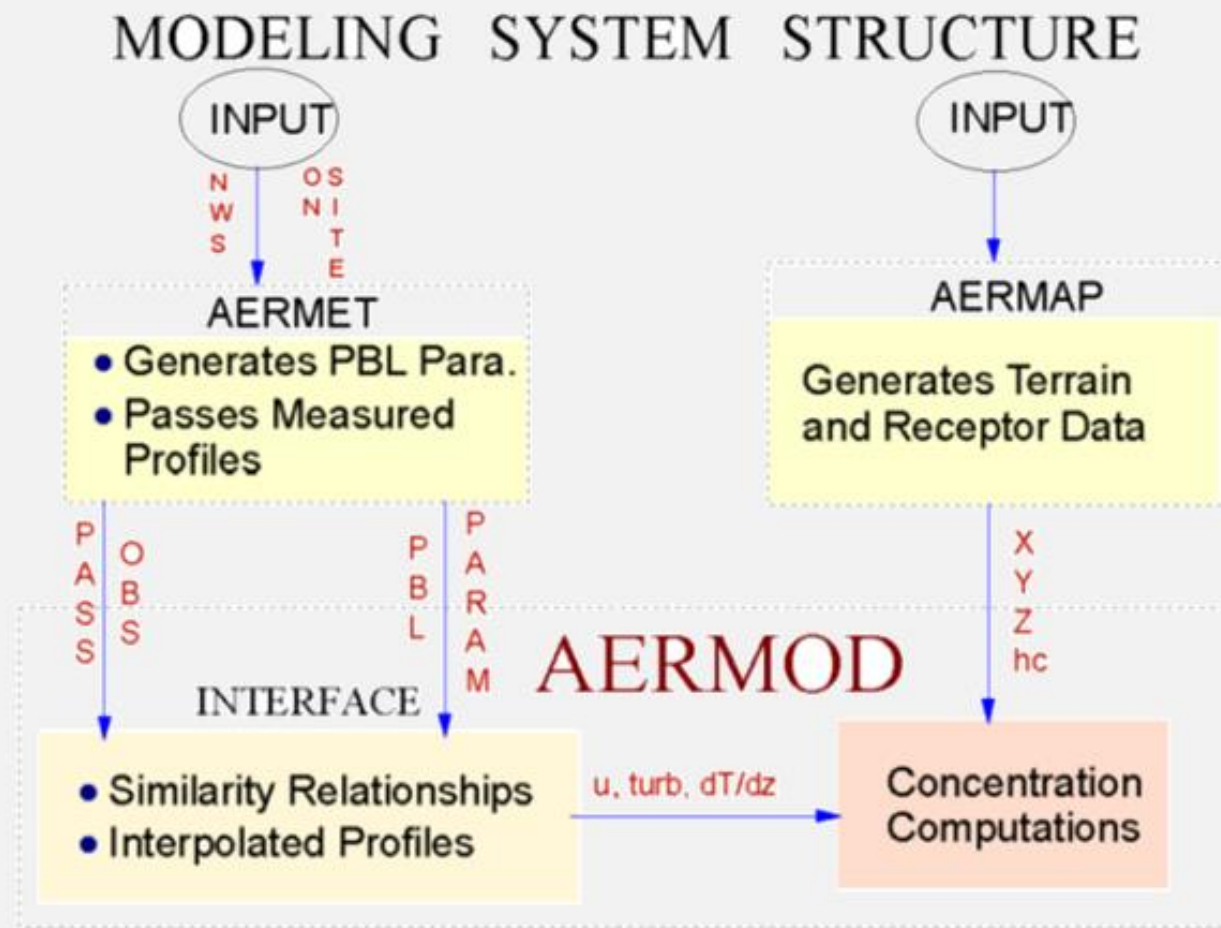
$$C_s\{x_r, y_r, z\} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\tilde{u}\sigma_{zs}} \cdot F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ \exp\left(-\frac{(z - h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) \right],$$





# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Estructura de AERMOD



AERMOD Model Formulation and Evaluation. EPA, 2019

# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo meteorológica AERMET

Requerimiento de datos mínimos:

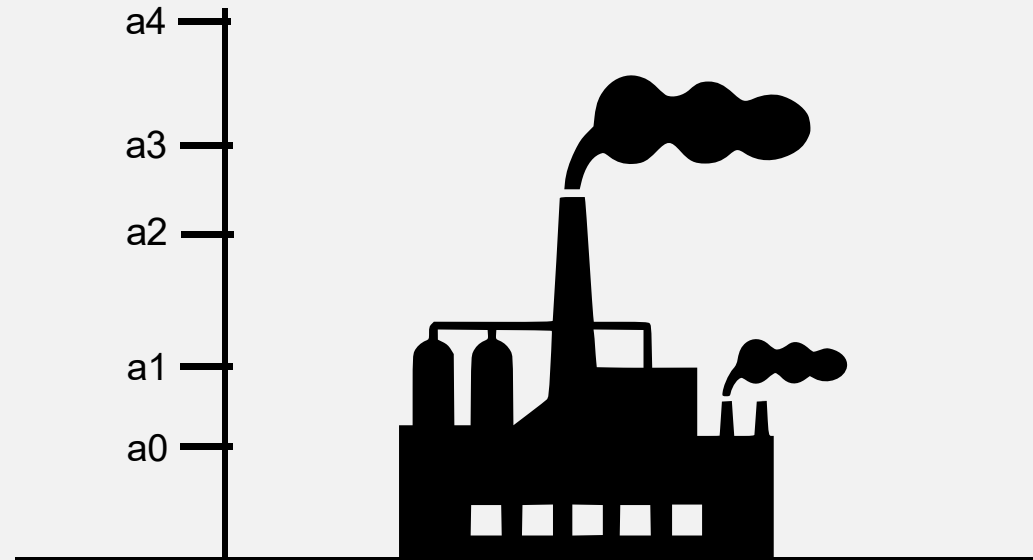
- En superficie:
  - Temperatura del bulbo seco (registrado a 2 metros)
  - Velocidad y dirección de viento (registrado a 10 metros)
  - Radiación solar (registrado a nivel de superficie)
  - Cobertura de nube, sino se cuenta con radiación solar.
- En altura (medidos mediante radio sondeo):
  - Perfil vertical de viento (velocidad y dirección) y temperatura
  - Dos registros mínimos: a las 07 y 12
- En caso de no contar con radiosondas, pueden realizarse mediciones de viento y temperatura mediante una torre meteorológica.



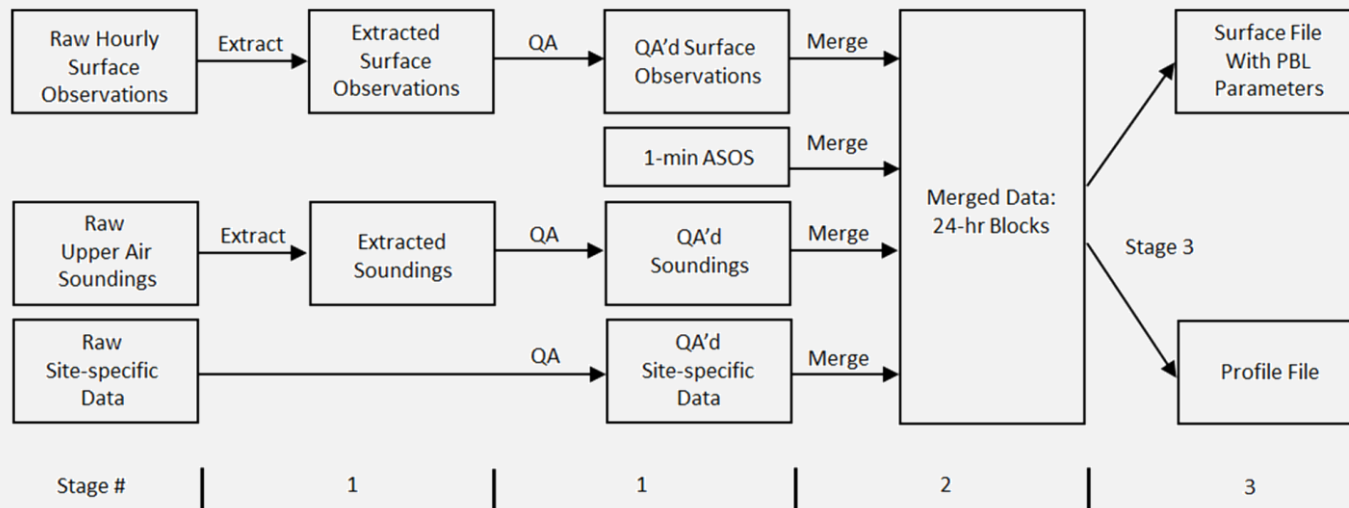
# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo meteorológica AERMET

- Torre meteorológica.
  - Estas mediciones deben incluir alturas antes y después de la fuente de emisión.
  - Debe registrarse la temperatura y el viento (velocidad y dirección).



## Configuración de rutinas:



# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo meteorológica AERMET

Salidas del modelo:

### • Perfil vertical (\*.PFL):

1	16	1	1	1	2.0	0	999.0	999.00	20.97	99.00	99.00
2	16	1	1	1	10.0	0	176.2	4.18	999.00	99.00	99.00
3	16	1	1	1	18.8	0	176.1	4.41	20.52	99.00	99.00
4	16	1	1	1	50.0	0	175.9	4.75	20.18	99.00	99.00
5	16	1	1	1	75.0	0	175.6	4.85	19.94	99.00	99.00
6	16	1	1	1	100.0	0	175.2	4.91	19.73	99.00	99.00
7	16	1	1	1	125.0	0	174.3	4.98	19.45	99.00	99.00
8	16	1	1	1	150.0	0	172.9	4.99	19.23	99.00	99.00
9	16	1	1	1	175.0	0	172.1	4.99	19.10	99.00	99.00
10	16	1	1	1	206.2	0	168.8	4.93	18.76	99.00	99.00
11	16	1	1	1	250.0	0	163.9	4.81	18.44	99.00	99.00
12	16	1	1	1	300.0	0	155.6	4.68	18.14	99.00	99.00
13	16	1	1	1	350.0	0	147.6	4.57	17.96	99.00	99.00
14	16	1	1	1	400.0	0	139.9	4.49	17.83	99.00	99.00
15	16	1	1	1	450.0	0	133.0	4.47	17.74	99.00	99.00
16	16	1	1	1	512.5	0	119.2	4.48	17.50	99.00	99.00
17	16	1	1	1	600.0	0	114.6	4.49	17.13	99.00	99.00
18	16	1	1	1	700.0	0	111.9	4.52	16.61	99.00	99.00
19	16	1	1	1	800.0	0	93.1	4.10	17.68	99.00	99.00
20	16	1	1	1	900.0	0	89.8	2.64	19.57	99.00	99.00
21	16	1	1	1	1100.0	0	87.1	0.29	20.40	99.00	99.00
22	16	1	1	1	1500.0	0	313.3	2.92	20.27	99.00	99.00
23	16	1	1	1	2000.0	0	338.6	3.49	19.06	99.00	99.00
24	16	1	1	1	2500.0	0	333.6	3.26	17.26	99.00	99.00
25	16	1	1	1	3000.0	0	322.9	1.98	14.60	99.00	99.00
26	16	1	1	1	3500.0	0	257.0	0.56	11.33	99.00	99.00
27	16	1	1	1	4000.0	0	210.8	1.58	7.64	99.00	99.00
28	16	1	1	1	4500.0	0	217.3	3.13	4.23	99.00	99.00
29	16	1	1	1	5000.0	1	215.6	2.74	-0.39	99.00	99.00
30	16	1	1	2	2.0	0	999.0	999.00	20.84	99.00	99.00
31	16	1	1	2	10.0	0	171.3	4.56	999.00	99.00	99.00
32	16	1	1	2	18.8	0	171.3	4.80	20.40	99.00	99.00
33	16	1	1	2	50.0	0	171.2	5.16	20.05	99.00	99.00
34	16	1	1	2	75.0	0	171.0	5.26	19.81	99.00	99.00
35	16	1	1	2	100.0	0	170.7	5.31	19.59	99.00	99.00
36	16	1	1	2	125.0	0	170.2	5.36	19.32	99.00	99.00
37	16	1	1	2	150.0	0	169.4	5.41	19.08	99.00	99.00
38	16	1	1	2	175.0	0	168.9	5.44	18.95	99.00	99.00
39	16	1	1	2	206.2	0	166.6	5.47	18.62	99.00	99.00
40	16	1	1	2	250.0	0	162.0	5.49	18.39	99.00	99.00
41	16	1	1	2	300.0	0	153.9	5.41	18.17	99.00	99.00
42	16	1	1	2	350.0	0	146.3	5.26	18.02	99.00	99.00
43	16	1	1	2	400.0	0	138.6	5.08	17.90	99.00	99.00

Parámetro	Unidad
Año, mes, día, hora	
Altura de medición	metros
1, si es el último nivel de la hora, o 0 si no lo es	
Dirección del viento (DV)	grados desde el norte
Velocidad del viento (VV)	m/s
Temperatura	°C
Desviación estandar de las fluctuaciones de la DV	degrees
Desviación estandar de las fluctuaciones de la VV	m/s



# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo meteorológica AERMET

Salidas del modelo:

- Datos superficiales (\*.SFC):

Parámetro	Units
Año, Mes, Día Juliano, Día del mes	
Flujo de calor sensible	W/m2
Velocidad de fricción, $u^*$	m/s
Escala de velocidad convectiva $v^*$	m/s
Gradiente de temperatura potencial vertical arriba de la PBL	K/m
Altura de la capa límite generada por convección - PBL	m
Altura de la capa límite generada mecánicamente - SBL	m
Longitud Monin-Obukhov	m
Longitud de rugosidad de la superficie	m
Razón de Bowen	
Albedo	0-1

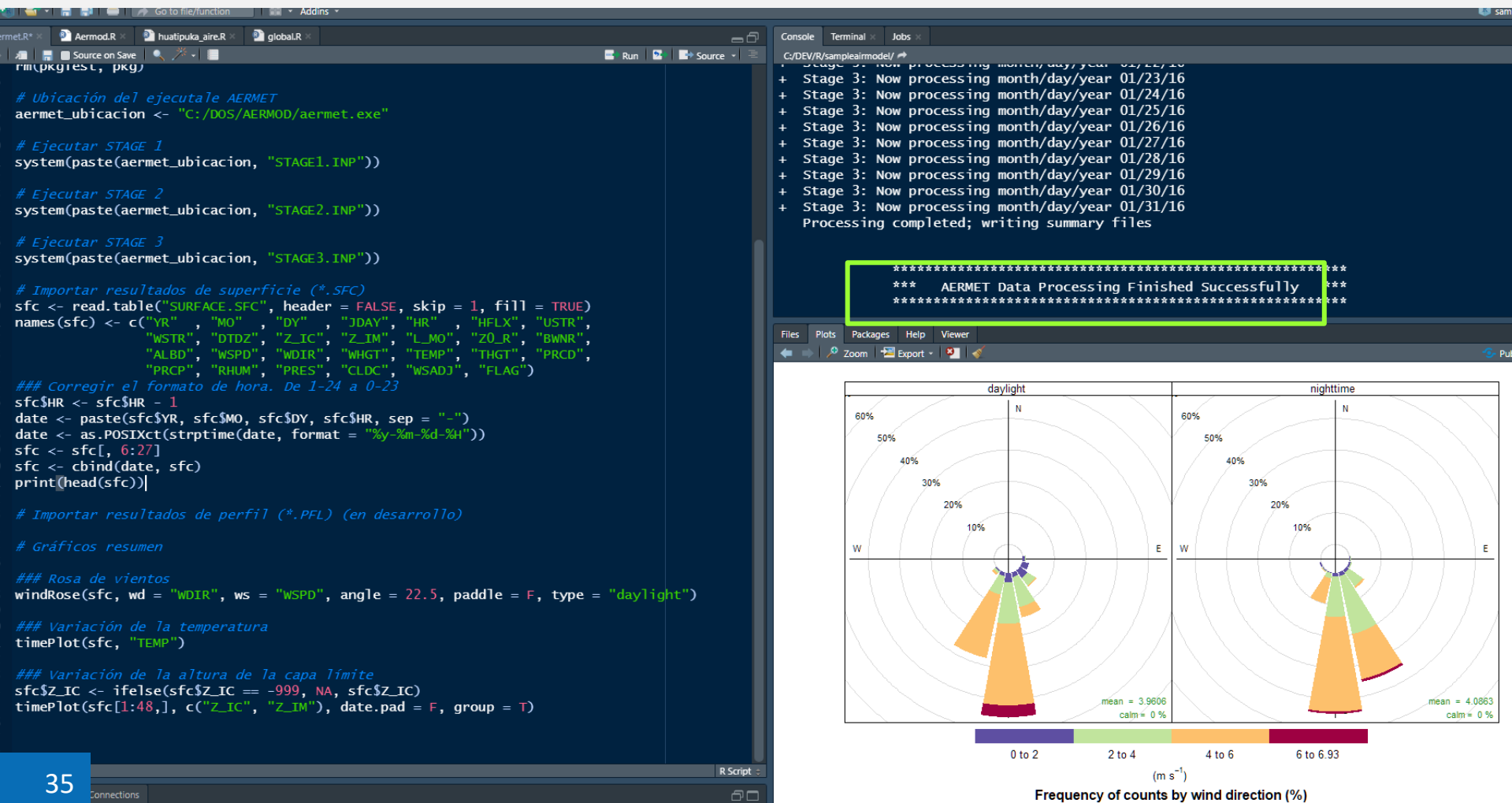
Parámetro	Units
Velocidad de viento (VV)	m/s
Dirección de viento (DV)	degrees
Altura de referencia para VV y DV	m
Temperatura	K
Altura de referencia para la temperatura	m
Código de precipitación	(0-45)
Tasa de precipitación	mm/hr
Humedad relativa	%
Presión atmosférica en la superficie	mb
Cobertura de nubes	décimas



# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo meteorológica AERMET

Ejemplo: [www.github.com/novvier/samplemodelair](http://www.github.com/novvier/samplemodelair)





# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo de dispersión AERMOD

Opciones de modelamiento:

- Opción DEFAULT, debe poseer:
  - para meteorología in-situ, un año de datos.
  - para meteorología modelada (WRF), tres años.
  - topografía (debe ejecutarse AERMAP)
- Opción NO DEFAULT,
  - En USA la EPA debe aprobar el uso de NO DEFAULT del modelo
- Opciones ALPHA y BETHA
  - Opciones experimentales

Otros inputs opcionales

- Estructuras. Para el cálculo de efecto arrastre por edificios (Building Downwash)
- Valores de nivel de fondo
- Consideraciones urbanas (población).
- Conversión de NO<sub>x</sub> a NO<sub>2</sub>



# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo de dispersión AERMOD

### Ejemplo de archivo de configuración:

```
** PARÁMETROS DE LAS FUENTES
*****
SO STARTING
** -----
** LOCALIZACIÓN
** -----
SO ELEVUNIT METERS
SO LOCATION AREAL AREAPOLY 288573.690 8646131.710 12.20
SO LOCATION LINE1 LINE 288367.328 8645905.048 288306.483 8645735.614 6.00
** -----
** EMISIÓN:
** -----
** TIPO AREA
** -----
** SRCID AREMIS RELHGT NVERTS
** g/ (g-m2) (M)
SO SRCPARAM AREAL 1.000 1.00 4
** SRCID X Y X Y
SO AREAVERT AREAL 288573.690 8646131.710 288751.220 8646039.600
SO AREAVERT AREAL 288659.120 8645862.070 288481.590 8645954.180
** -----
** TIPO LINEA
** -----
** SRCID Lnemis Relhgt Width Szinit
** g/ (g-m2) (M) (M)
SO SRCPARAM LINE1 1.000 1.00 1.50
** -----
** VARIACIÓN TEMPORAL DE LAS EMISIONES
** HOUR-OF-DAY 0-8 8-12 12-14 14-17 17-0
SO EMISFACT AREAL HROFDY 8*0.00E-00 4*3.46E-05 2*3.32E-05 3*9.23E-06 7*0.00E-00
SO EMISFACT LINE1 HROFDY 8*0.00E-00 4*1.94E-04 2*1.94E-04 3*1.94E-04 7*0.00E-00
** -----
** PARÁMETROS DE ARRASTRE POR EDIFICIOS
** NO APLICA
** -----
** NIVELES DE FONDO
SO BACKGRND HROFDY 56.97 35.42 137.07 118.24 79.85 52.14 48.51 62.91
SO BACKGRND HROFDY 69.50 90.11 86.67 88.36 68.93 69.16 73.46 87.02
SO BACKGRND HROFDY 70.92 80.37 54.01 112.60 110.36 85.48 45.57 55.54
SO BACKUNIT UG/M3
** -----
SO SRCGROUP ALL BACKGRND
SO FINISHED
```

```
*****
** Parámetros de receptores
*****
**
RE STARTING
RE INCLUDED ../../1_GEO/RECEPTOR_GRID.DAT
RE FINISHED
**
**
*****
** Parámetros de meteorológicos
*****
**
ME STARTING
ME SURFFILE ../../2_MET/MET2015788_AERMET_2016-2018.SFC
ME PROFFILE ../../2_MET/MET2015788_AERMET_2016-2018.PFL
ME SURFDATA 0 2017
ME UAIRDATA 99999 2017
ME SITEDATA 99999 2017
ME PROFBASE 13.28 METERS
ME STARTEND 2016 01 01 2018 12 31
ME FINISHED
**
**
*****
** Parámetros de salida
*****
**
OU STARTING
OU RECTABLE ALLAVE FIRST
OU RECTABLE 24 1ST
OU PLOTFILE 24 ALL 1ST CONS_PM10_24HR.PLT 31
OU SUMMFILE CONS_PM10_AERTEST_PLOT.OUT
OU FINISHED
```

# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo de dispersión AERMOD

### Ejemplo de archivo de salida: (PLOTIO)

```
* AERMOD ( 19191): DISPERSIÓN - PM10
* AERMET ( 19191): EJECUTADO POR N. USCUCHAGUA
* MODELING OPTIONS USED: RegDEFAULT CONC ELEV FLGPOL RURAL ADJ_U* MMIF_Data
* PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 24-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL
* FOR A TOTAL OF 730 RECEPTORS.
* FORMAT: (3(1X,F13.5),3(1X,F8.2),3X,A5,2X,A8,2X,A5,5X,A8,2X,I8)
* X Y AVERAGE CONC ZELEV ZHILL ZFLAG AVE GRP RANK NET ID DATE (CONC)
* 287493.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287593.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287693.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287793.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287893.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287993.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288093.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288193.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288293.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288393.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288493.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288593.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 165.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288693.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 165.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288793.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 165.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288893.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 164.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288993.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 164.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 289093.00000 8644881.00000 76.63208 0.00 164.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287493.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287593.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287693.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 0.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287793.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287893.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 287993.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288093.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288193.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
* 288293.00000 8644981.00000 76.63208 0.00 168.00 1.50 24-HR ALL 1ST AII 16010124
```

# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo de dispersión AERMOD

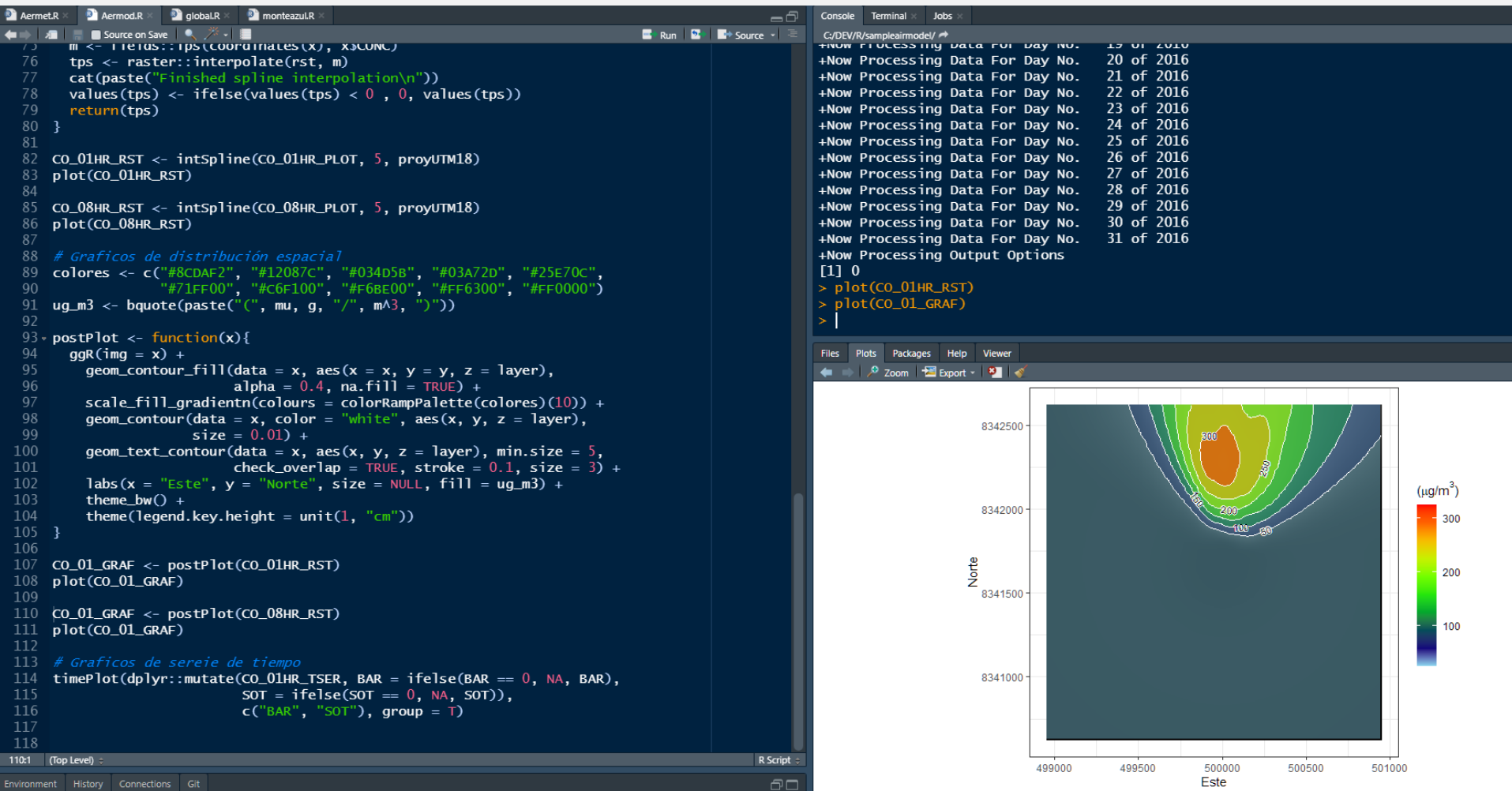
### Ejemplo de archivo de salida: (SERIE DE TIEMPO)

* AERMOD ( 19191): DISPERSIÓN - CO								02/03/20	
* AERMET ( 19191): EJECUTADO POR N. USCUCHAGUA								07:29:16	
* MODELING OPTIONS USED: RegDEFAULT CONC ELEV FLGPOL RURAL ADJ_U* MMIF_Data									
* POST/PLOT FILE OF CONCURRENT 1-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL									
* FOR A TOTAL OF 6 RECEPTORS.									
* FORMAT: (3(1X,F13.5),3(1X,F8.2),2X,A6,2X,A8,2X,I8.8,2X,A8)									
* X Y AVERAGE CONC ZELEV ZHILL ZFLAG AVE GRP DATE NET ID									
* 288303.00000 8645775.00000 0.00000 5.00 168.00 1.50 1-HR ALL 16010101									
288746.00000 8645950.00000 0.00000 10.58 168.00 1.50 1-HR ALL 16010101									
288528.00000 8645804.00000 0.00000 5.80 168.00 1.50 1-HR ALL 16010101									
288539.00000 8645652.00000 0.00000 6.66 168.00 1.50 1-HR ALL 16010101									
289073.00000 8646370.00000 0.00000 152.86 164.00 1.50 1-HR ALL 16010101									
289004.00000 8646471.00000 0.00000 153.04 153.04 1.50 1-HR ALL 16010101									
288303.00000 8645775.00000 0.00000 5.00 168.00 1.50 1-HR ALL 16010102									
288746.00000 8645950.00000 0.00000 10.58 168.00 1.50 1-HR ALL 16010102									
288528.00000 8645804.00000 0.00000 5.80 168.00 1.50 1-HR ALL 16010102									
288539.00000 8645652.00000 0.00000 6.66 168.00 1.50 1-HR ALL 16010102									
289073.00000 8646370.00000 0.00000 152.86 164.00 1.50 1-HR ALL 16010102									
289004.00000 8646471.00000 0.00000 153.04 153.04 1.50 1-HR ALL 16010102									
288303.00000 8645775.00000 0.00000 5.00 168.00 1.50 1-HR ALL 16010103									
288746.00000 8645950.00000 0.00000 10.58 168.00 1.50 1-HR ALL 16010103									
288528.00000 8645804.00000 0.00000 5.80 168.00 1.50 1-HR ALL 16010103									
288539.00000 8645652.00000 0.00000 6.66 168.00 1.50 1-HR ALL 16010103									
289073.00000 8646370.00000 0.00000 152.86 164.00 1.50 1-HR ALL 16010103									
289004.00000 8646471.00000 0.00000 153.04 153.04 1.50 1-HR ALL 16010103									
288303.00000 8645775.00000 0.00000 5.00 168.00 1.50 1-HR ALL 16010104									
288746.00000 8645950.00000 0.00000 10.58 168.00 1.50 1-HR ALL 16010104									
288528.00000 8645804.00000 0.00000 5.80 168.00 1.50 1-HR ALL 16010104									
288539.00000 8645652.00000 0.00000 6.66 168.00 1.50 1-HR ALL 16010104									

# Modelos tipo Gaussiano (AERMOD)

## Modelo de dispersión AERMOD

Ejemplo: [www.github.com/novvier/samplemodelair](https://www.github.com/novvier/samplemodelair)



# Auditoría del modelado

## Gestión de inputs y outputs:

- Todo informe de modelamiento debe presentar un fichero donde se especifique los datos de ingreso. Muchos softwares lo presentan como reporte o como fichero de configuración.

```
*** AERMOD - VERSION 16216r *** *** DISPERSIÓN UEA - ESCENARIO 1 - PM2.5 *** 04/24/17
*** AERMET - VERSION 16216 *** *** 00:54:09
*** MODEL_OPTS: RegDEFAULT CONC ELEV RURAL BULKRN PAGE 1

*** MODEL SETUP OPTIONS SUMMARY ***
-----

**Model Is Setup For Calculation of Average CONcEntration Values.

-- DEPOSITION LOGIC --
**NO GAS DEPOSITION Data Provided.
**NO PARTICLE DEPOSITION Data Provided.
**Model Uses NO DRY DEPLETION. DRYDPLT = F
**Model Uses NO WET DEPLETION. WETDPLT = F

**Model Uses RURAL Dispersion Only.

**Model Uses Regulatory DEFAULT Options:
1. Stack-tip Downwash.
2. Model Accounts for ELEvated Terrain Effects.
3. Use Calms Processing Routine.
4. Use Missing Data Processing Routine.
5. No Exponential Decay.

**Other Options Specified:
BULKRN - Use BULKRN Delta-T and SolarRad option for SBL in AERMET
TEMP_Sub - Meteorological data includes TEMP substitutions

**Model Assumes No FLAGPOLE Receptor Heights.

**The User Specified a Pollutant Type of: PM_2.5

**Model Calculates 1 Short Term Average(s) of: 24-HR
and Calculates ANNUAL Averages

**This Run Includes: 281 Source(s); 1 Source Group(s); and 1691 Receptor(s)

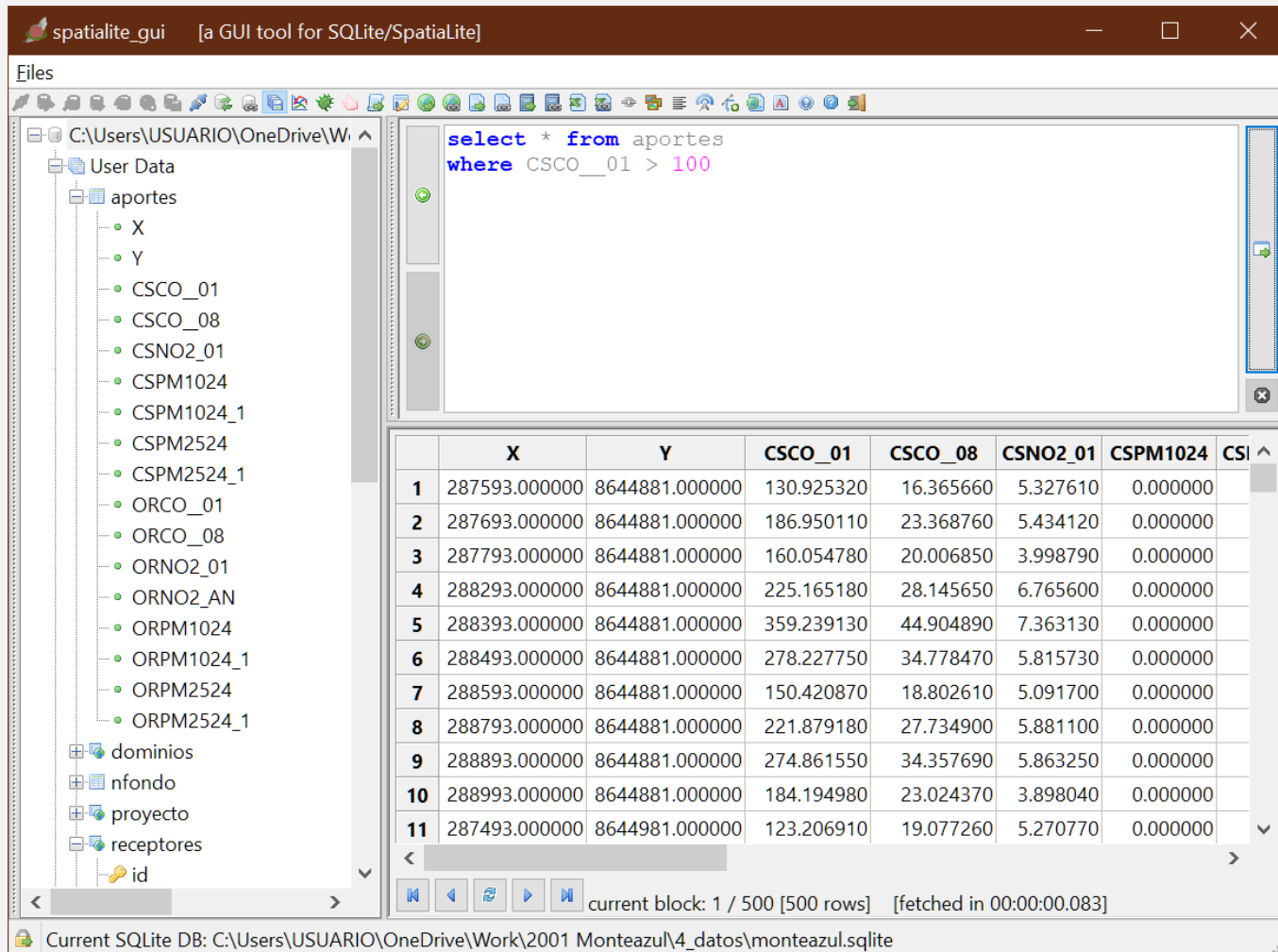
with: 0 POINT(s), including
      0 POINTCAP(s) and 0 POINTHOR(s)
and: 277 VOLUME source(s)
and: 4 AREA type source(s)
and: 0 LINE source(s)
```



# Auditoría del modelado

## Gestión de inputs y outputs:

- Es recomendable el uso de base de datos para el almacenamiento de datos de ingreso y resultados del modelo.



The screenshot shows the spatialite\_gui application window. The title bar reads "spatialite\_gui [a GUI tool for SQLite/Spatialite]". The interface includes a file explorer on the left, a SQL query editor in the center, and a table view of the query results at the bottom.

**Files:** C:\Users\USUARIO\OneDrive\Work\2001 Monteazul\4\_datos\monteazul.sqlite

**User Data:**

- aportes
  - X
  - Y
  - CSCO\_01
  - CSCO\_08
  - CSNO2\_01
  - CSPM1024
  - CSPM1024\_1
  - CSPM2524
  - CSPM2524\_1
  - ORCO\_01
  - ORCO\_08
  - ORNO2\_01
  - ORNO2\_AN
  - ORPM1024
  - ORPM1024\_1
  - ORPM2524
  - ORPM2524\_1
- dominios
- nfono
- proyecto
- receptores
- id

**SQL Query:**

```
select * from aportes
where CSCO_01 > 100
```

**Query Results:**

	X	Y	CSCO_01	CSCO_08	CSNO2_01	CSPM1024	CSI
1	287593.000000	8644881.000000	130.925320	16.365660	5.327610	0.000000	
2	287693.000000	8644881.000000	186.950110	23.368760	5.434120	0.000000	
3	287793.000000	8644881.000000	160.054780	20.006850	3.998790	0.000000	
4	288293.000000	8644881.000000	225.165180	28.145650	6.765600	0.000000	
5	288393.000000	8644881.000000	359.239130	44.904890	7.363130	0.000000	
6	288493.000000	8644881.000000	278.227750	34.778470	5.815730	0.000000	
7	288593.000000	8644881.000000	150.420870	18.802610	5.091700	0.000000	
8	288793.000000	8644881.000000	221.879180	27.734900	5.881100	0.000000	
9	288893.000000	8644881.000000	274.861550	34.357690	5.863250	0.000000	
10	288993.000000	8644881.000000	184.194980	23.024370	3.898040	0.000000	
11	287493.000000	8644981.000000	123.206910	19.077260	5.270770	0.000000	

current block: 1 / 500 [500 rows] [fetched in 00:00:00.083]

Current SQLite DB: C:\Users\USUARIO\OneDrive\Work\2001 Monteazul\4\_datos\monteazul.sqlite



# Auditoría del modelado

## Variables de ingreso:

Deben poseer representatividad temporal y espacial:

- Temporal:
  - Los registros deben incluir estaciones las húmeda y seca
  - Los registros deben incluir las horas de emisión.
- Espacial:
  - El dominio del modelo de estar acorde a las fuentes de emisión y receptores a evaluar.
  - La resolución de la información meteorológica debe estar acorde a la topografía.

La información de ingreso debe ser consistente:

- Se debe realizar un análisis estadístico descriptivo para las variables más importantes (temperatura, viento, radiación o cobertura de nube, altura de mezcla, precipitación en caso de deposición húmeda).
- En caso de información estimada (p.ej. meteorología modelada), se recomienda la comparación con registros de mediciones.



# Auditoría del modelado

## **Variables de salida:**

Deben realizarse mapas/gráficos de isopletas de concentración:

- Especificando el método de interpolación.
- Incluyendo fuentes y receptores.

## **Reproductibilidad:**

El modelo debe poseer la capacidad de ser reproducido o replicado por otros (cliente, autoridad evaluadora).

- Se recomienda el uso de algoritmos y diagramas de flujo que permitan seguir la ejecución del modelo.

## **Control de errores:**

- Análisis de consistencia.
  - Evitar la duplicidad de las emisiones
  - Evaluar el grado de precisión de las emisiones (AP-42)



# Auditoría del modelado

## Contenido mínimo de un informe de modelamiento:

- Configuración del dominio
- Justificación del modelo a usar. Especificar la versión del modelo
- Supuesto del modelamiento
- Modelo conceptual
- Análisis meteorológico
- Análisis geofísico (topografía y condiciones de superficie)
- Cálculo del nivel de fondo
- Cálculo de las emisiones
- Cálculo de reducción de las medidas de mitigación.
- Distribución espacial de aportes e inmisión final
- Aportes e inmisión final en receptores discretos





“no cualquiera puede convertirse en un gran modelador, pero un gran modelador puede provenir de cualquier lado.”

Gracias por su atención...

mayo de 2020