

# *Charla 8: Condiciones Meteorológicas Propicias para $PM_{2.5}$*

**Taller Centroamericano de  
Pronosticado de la Calidad del Aire**  
San José, Costa Rica  
17-21 de Octubre del 2011

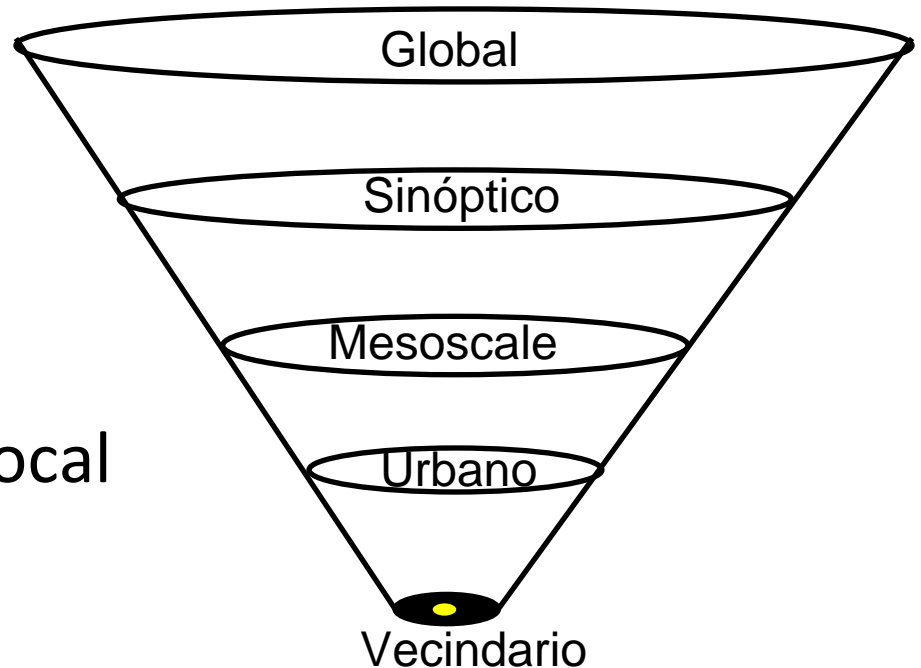


# Meteorología

- Es el estudio de los fenómenos atmosféricos y de los mecanismos que producen el tiempo, orientado a su predicción. Del griego, meteoros (alto), logos (tratado).
- Los fenómenos atmosféricos o meteoros pueden ser:
  - Aéreos, como el viento, acuosos, como la lluvia, la nieve y el granizo, luminosos, como la aurora polar o el arco iris y eléctricos, como el rayo.
  - Procesos atmosféricos tales como el movimiento del aire (viento) y el intercambio de calor (por ejemplo, la convección y la radiación) determinan el destino de los contaminantes a medida que pasan por las etapas de transporte, dispersión, transformación y remoción.
  - La Meteorología de la contaminación del aire es el estudio de cómo estos procesos atmosféricos afectan el destino de los contaminantes del aire.

# Visión General

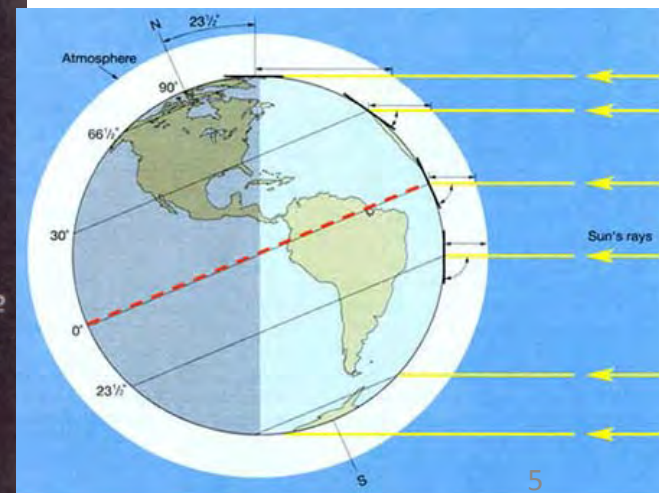
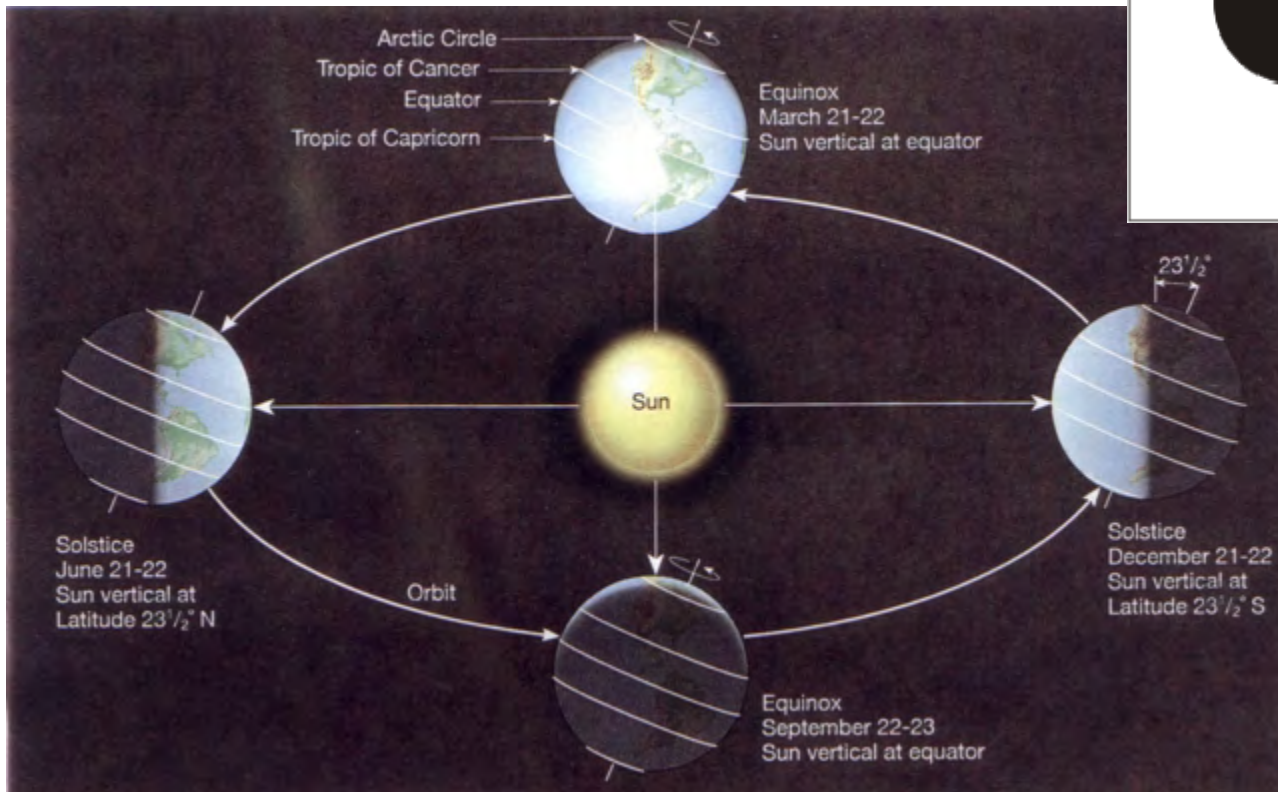
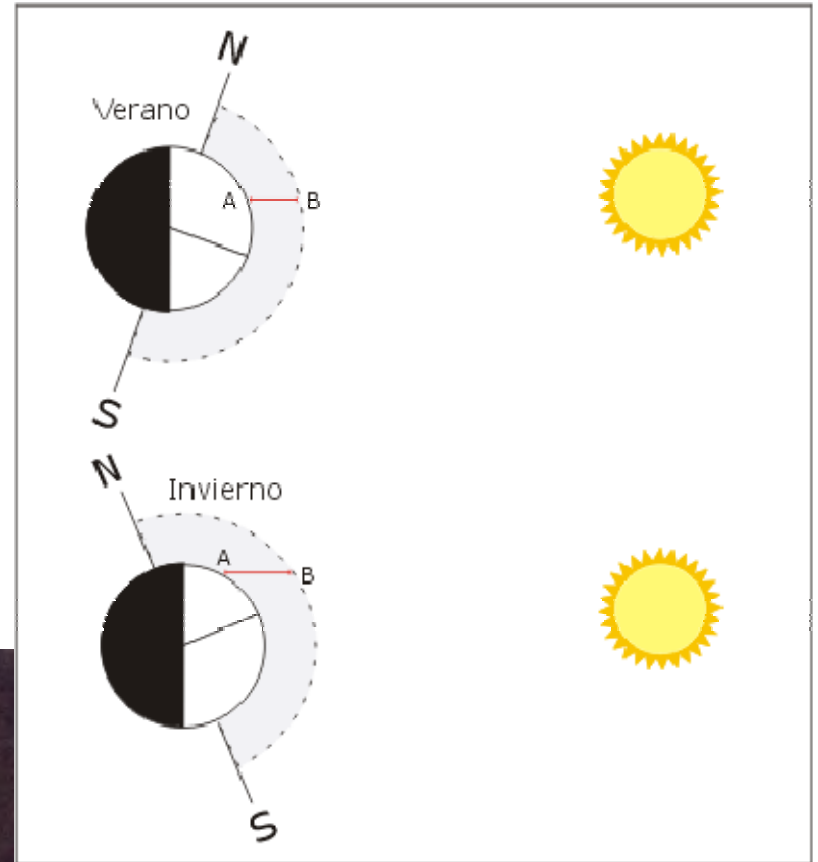
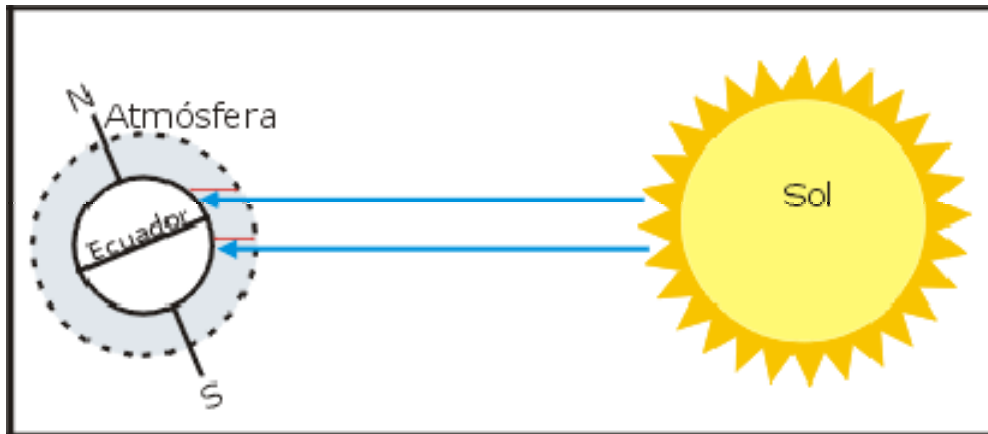
- Procesos meteorológicos que influyen en la calidad del aire
  - Luz Solar
  - Dispersión Horizontal
  - Mezclado Vertical
  - Transporte
  - Nubes y precipitación
  - Temperatura y humedad
- De escala global a escala local



# Meteorología en Calidad del Aire

- Sistemas de alta y baja presión en altura
- Ascenso y descenso de masas de aire
- Presiones altas y bajas en superficie
- Estructura de la temperatura vertical
  - Inversiones
  - Estabilidad
  - Mezclado
- Nubes y precipitación
- Vientos
  - Escala sinóptica
  - Meso escala
  - Transporte (en superficie y altura)

# Estaciones del Año



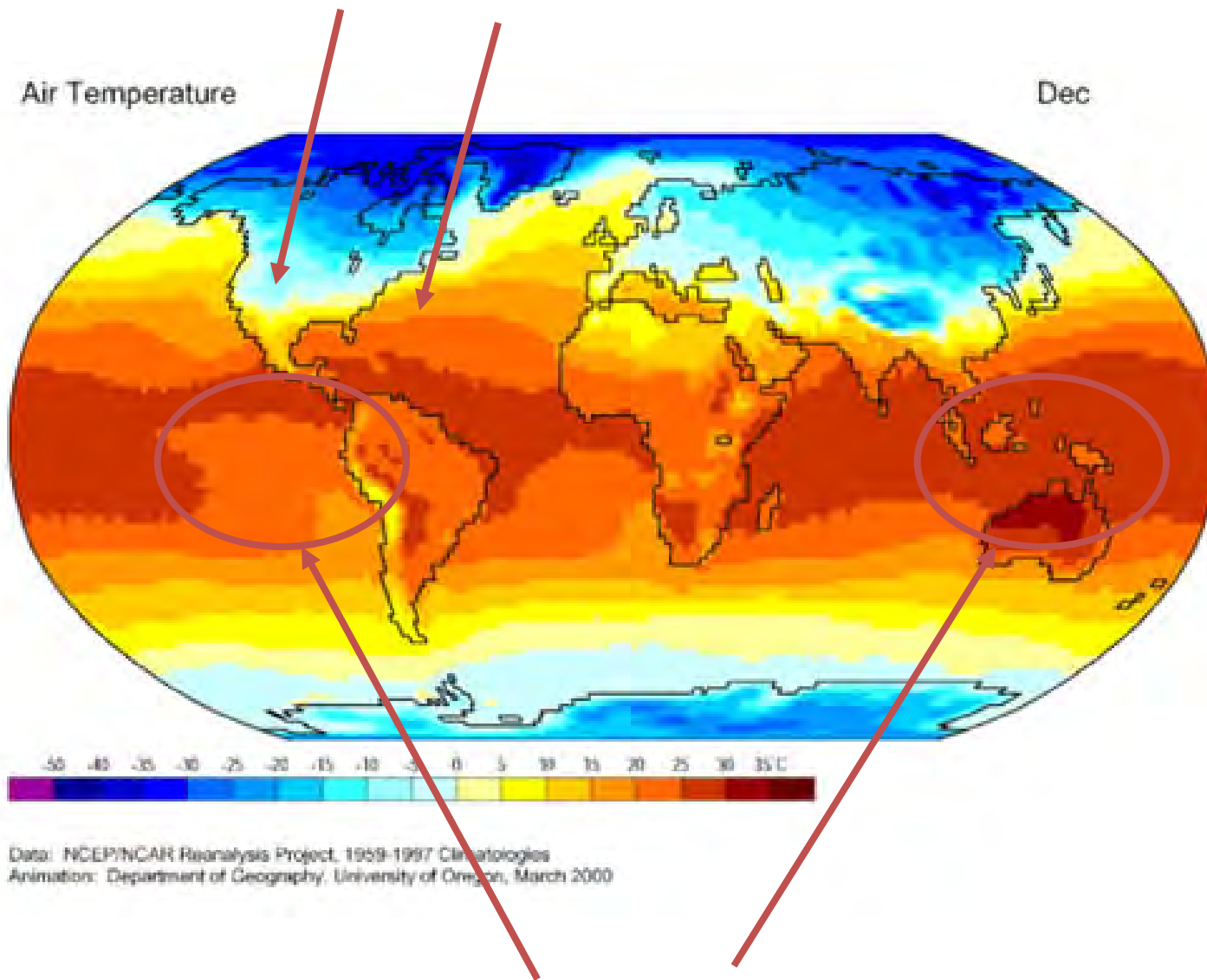
## Calentamiento diferencial

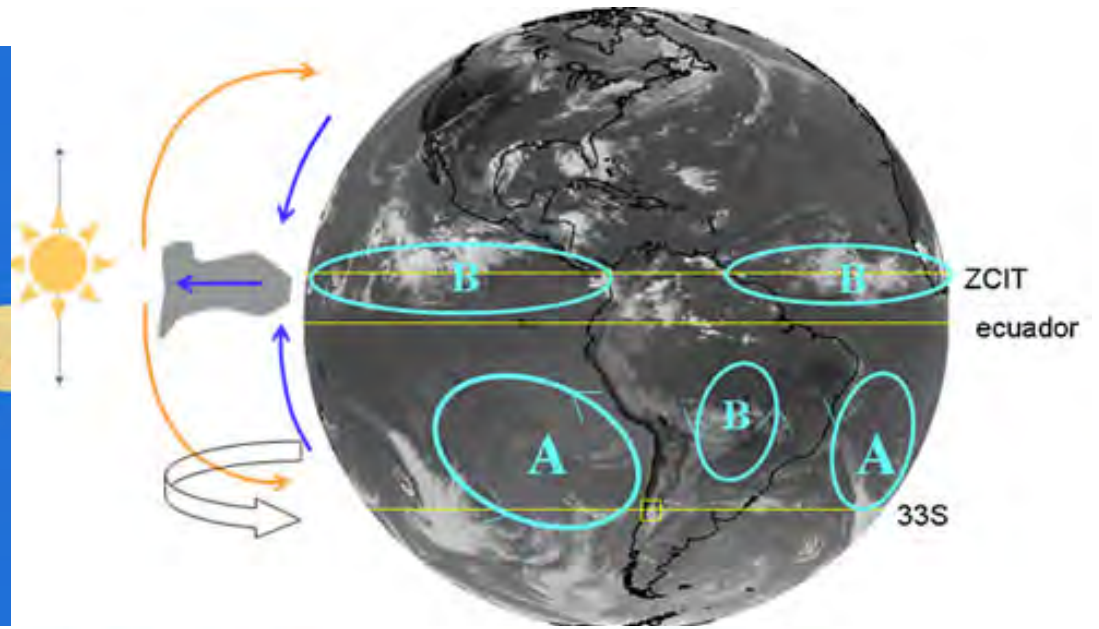
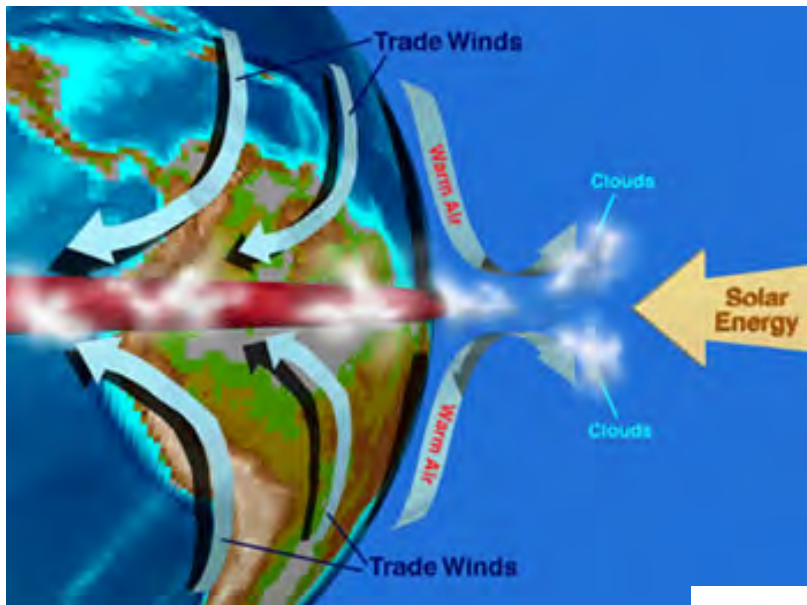
- La superficie terrestre no sólo recibe diferentes magnitudes de radiación solar sino que las diversas superficies terrestres absorben energía térmica en magnitudes distintas.
- El color, la forma, la textura de la superficie, la vegetación y la presencia de construcciones pueden influir en el calentamiento y enfriamiento de la Tierra.

## Calentamiento diferencial

- Por lo general, las superficies secas se calientan y enfrían más rápidamente que las húmedas. Las áreas aradas, las playas arenosas y los caminos pavimentados se calientan más que las praderas y las áreas boscosas. Durante el día, el aire de un terreno arado es más cálido que el de un bosque o un pantano; durante la noche, la situación es inversa.
- La propiedad que hace que las diferentes superficies se calienten y se enfríen en velocidades distintas se denomina **calentamiento diferencial**.

# Calentamiento Diferencial en la Atmósfera





# Las ondas

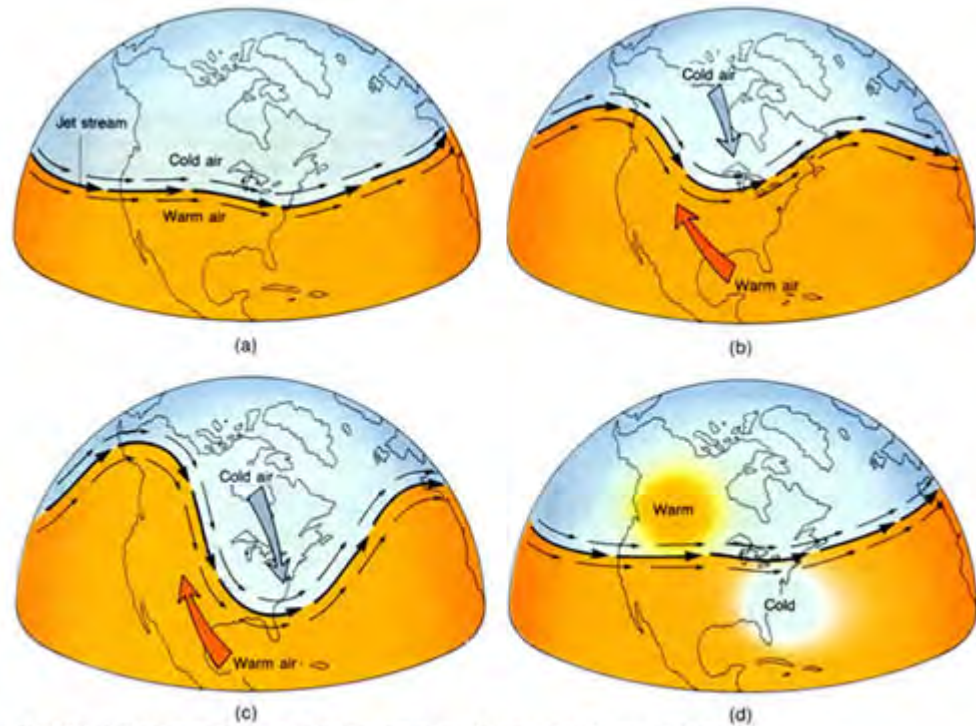
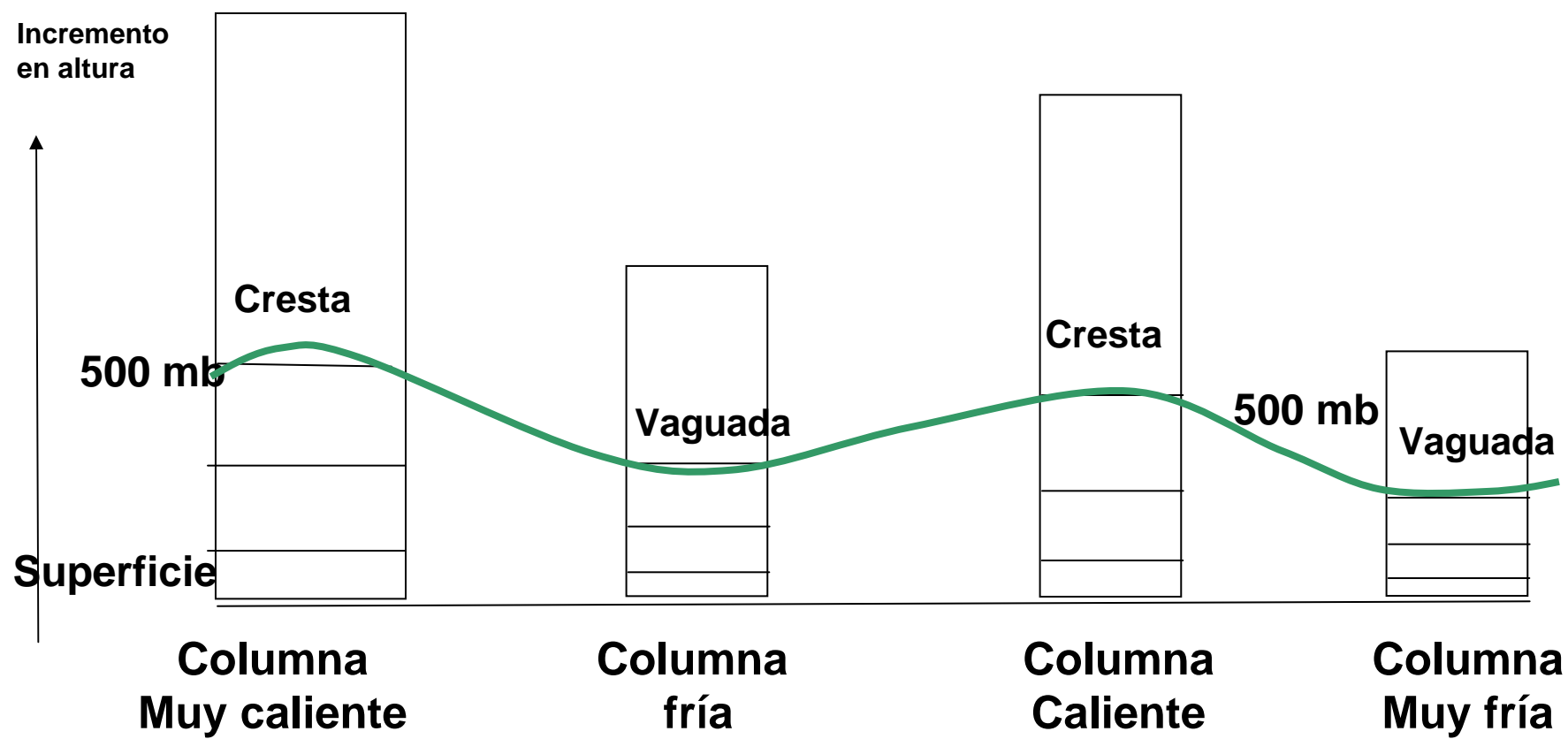


Figure 8-9 Cyclic changes that occur in the upper-level airflow of the westerlies. The flow, which has the jet stream as its axis, starts out nearly straight and then develops meanders that are eventually cut off. (After J. Namias, NOAA)

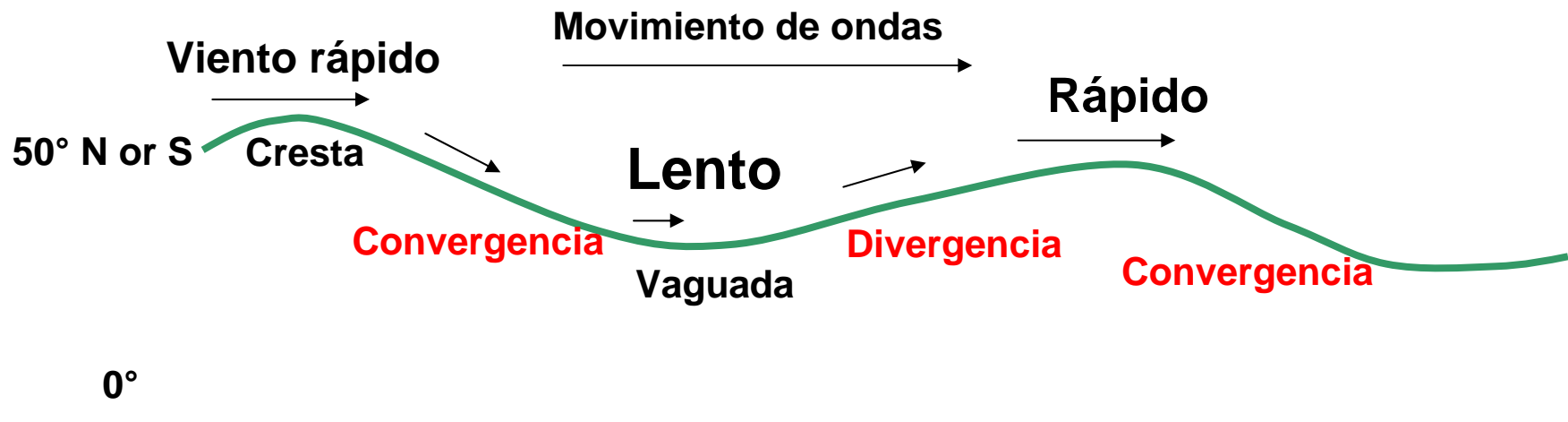
# Crestas y Vaguadas

- Crestas y depresiones de aire caliente y frío en altura
- La altura de la superficie de 600 mb de presión depende de la temperatura de la columna relativa



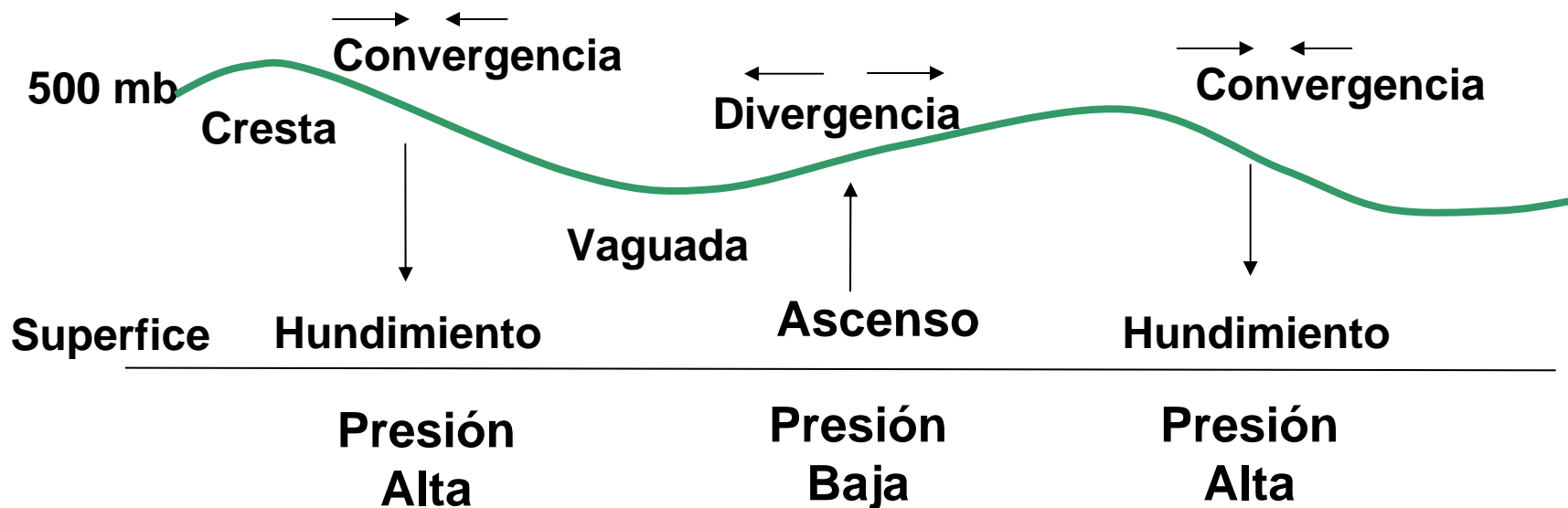
## Crestas y Vaguadas en altura

- Las ondas (crestas y vaguadas) se mueven generalmente de oeste a este
- Los vientos generalmente viajan más rápido alrededor de las crestas y a menor intensidad en las depresiones
- Áreas de convergencia y divergencia en altura



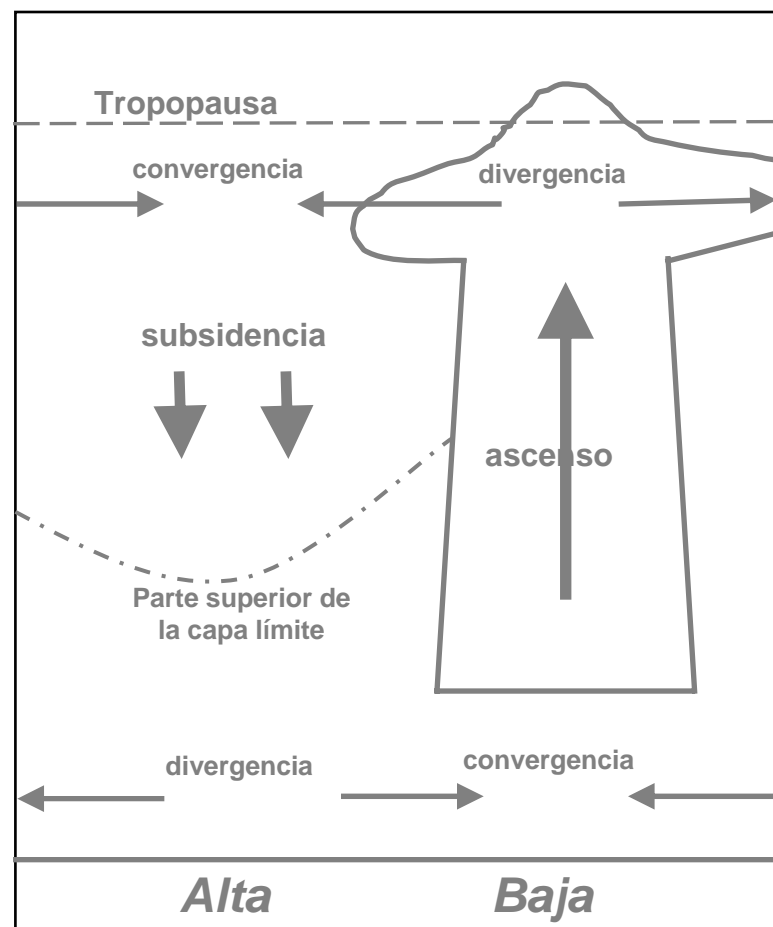
## Crestas y Vaguadas en altura

- Las divergencias en altura producen un movimiento ascendente y presión baja en superficie.
- Las convergencias en altura producen un movimiento descendente y alta presión en superficie.
- Los patrones de presión en superficie están desplazados con respecto a los de altura



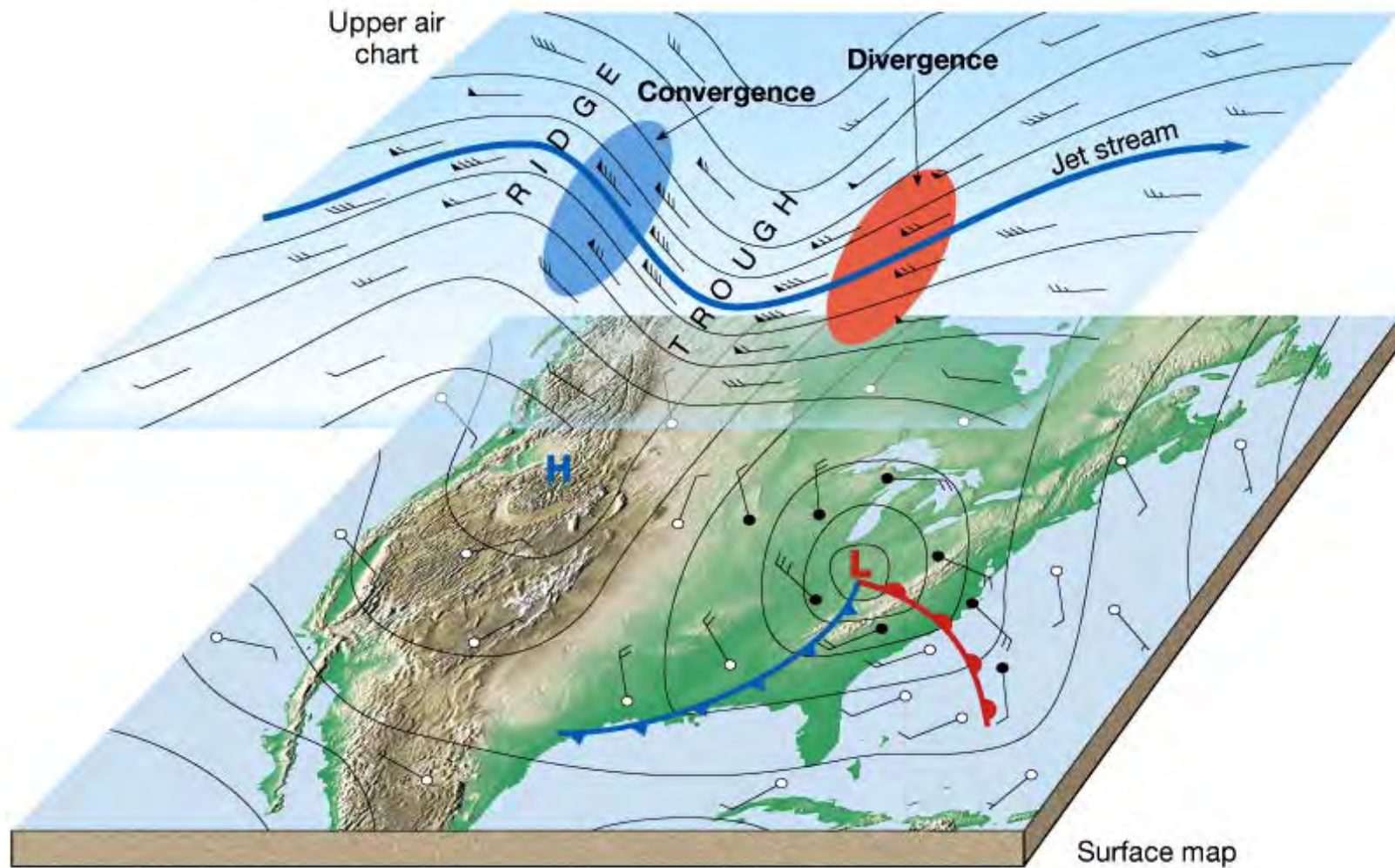
## Crestas y Vaguadas en altura

- Movimiento descendente
  - Calienta el aire
  - Crea condiciones estables
  - Reduce el mezclado vertical
  - Cielos despejados
  - Asociado a eventos de alta contaminación
- Movimiento ascendente
  - Enfría el aire
  - Crea condiciones inestables
  - Incrementa el mezclado
  - Causa nubosidad
  - Asociado a baja contaminación



Stull (2000)

# Patrones en Altura y Superficie

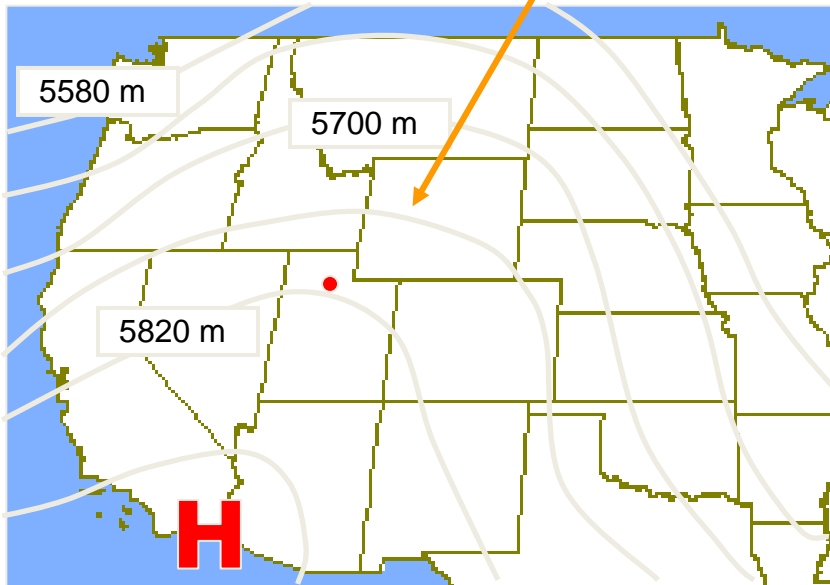


Lutgens and Tarbcuk, 2006

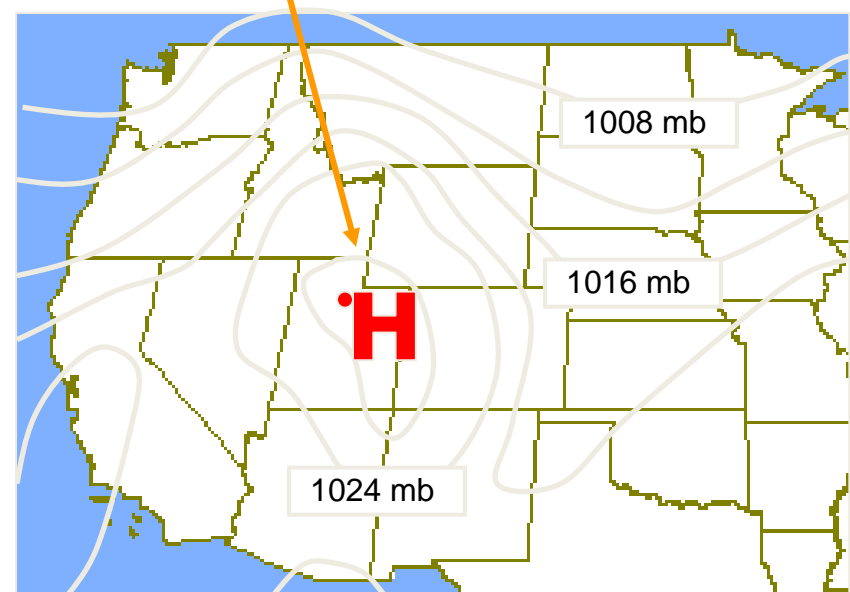
# Patrones en superficie, en altura y CA

## Ejemplo 1

cresta= vaguada = alta superficie



Alturas de 500-mb en la tarde del 7 enero, 2002 (00Z Jan 8)



Presión en superficie en la tarde del 7 de enero, 2002 (00Z Jan 8)

Alta concentración de  $PM_{2.5}$  en Salt Lake City, Utah, USA

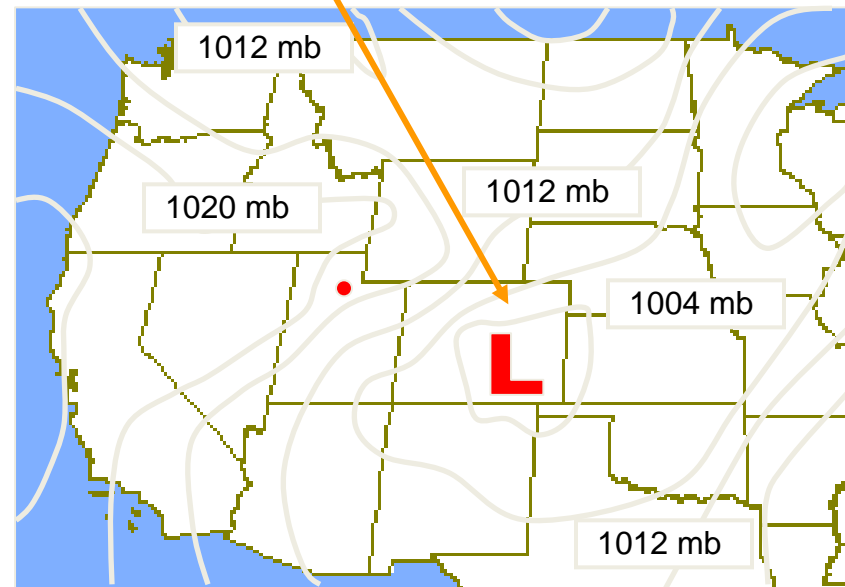
# Patrones en superficie, en altura y CA

## Ejemplo 2

vaguada= ascenso= baja en superficie



Alturas de 500-mb pot la tarde del 22 de enero, 2002 (00Z Jan 23)



Presión de superficie en la tarde del 22 de enero, 2002 (00Z Jan 23)

Bajo  $PM_{2.5}$  en Salt Lake City, Utah, EU

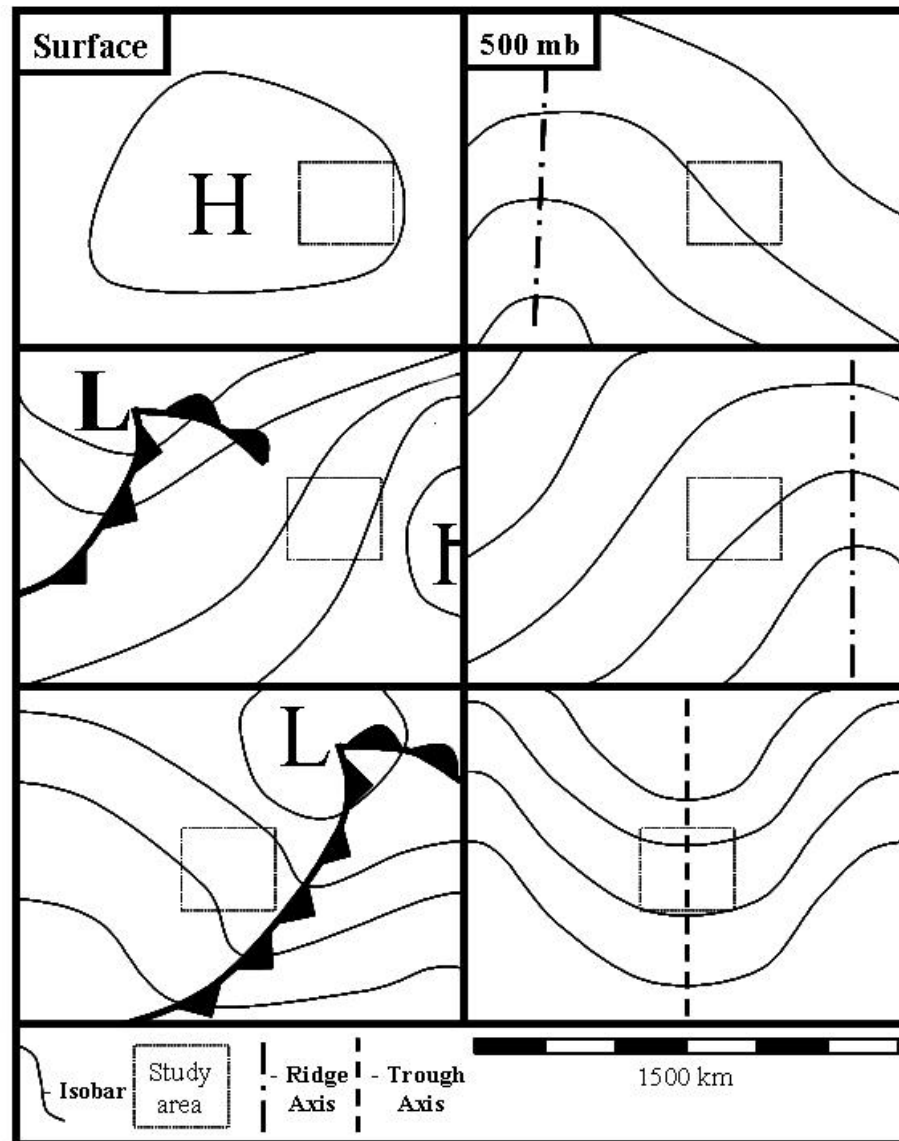
# Ciclo de vida de patrones en altura y superficie

*La calidad del aire generalmente cambia con los cambios del clima*

Alta en superficie  
Al acercarse la cresta

Parte posterior con alta en superficie  
Frente cálido  
Vaguada acercándose

Baja en superficie  
Frente Frio  
Hundimiento

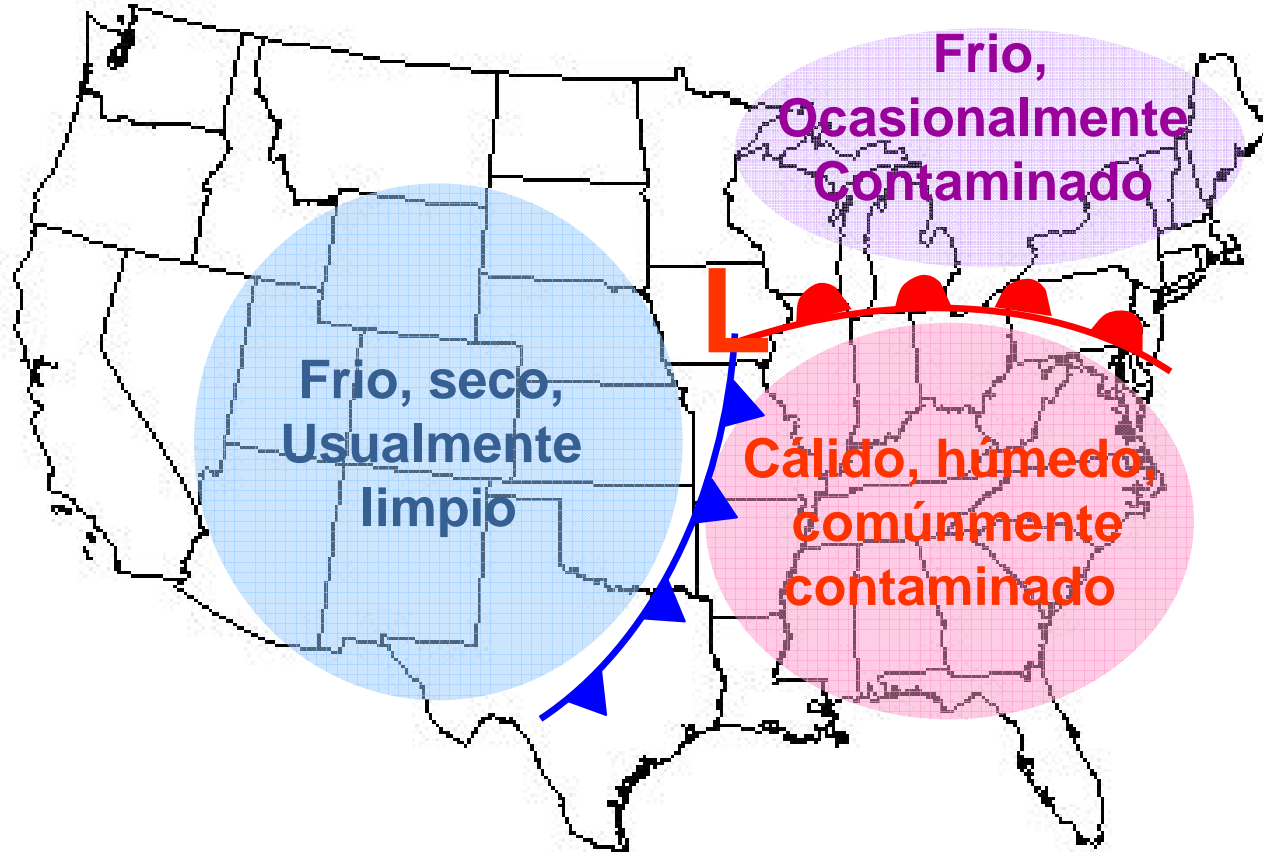


# Masas de Aire

- Tipos
  - cP – Polar Continental
    - Fría, seca, estable
    - Masa de aire cP extremadamente fría se puede llamar cA (continental Arctic)
  - mP – Polar marítima
    - Cool, moist, unstable
  - mT – Tropical marítima
    - Cálida, húmeda, usualmente inestable
  - cT – Tropical continental
    - Caliente, seca
    - Aire estable en altura, inestable en superficie
- Cambios en las masas de aire a menudo resultan en cambios grandes en la calidad del aire.

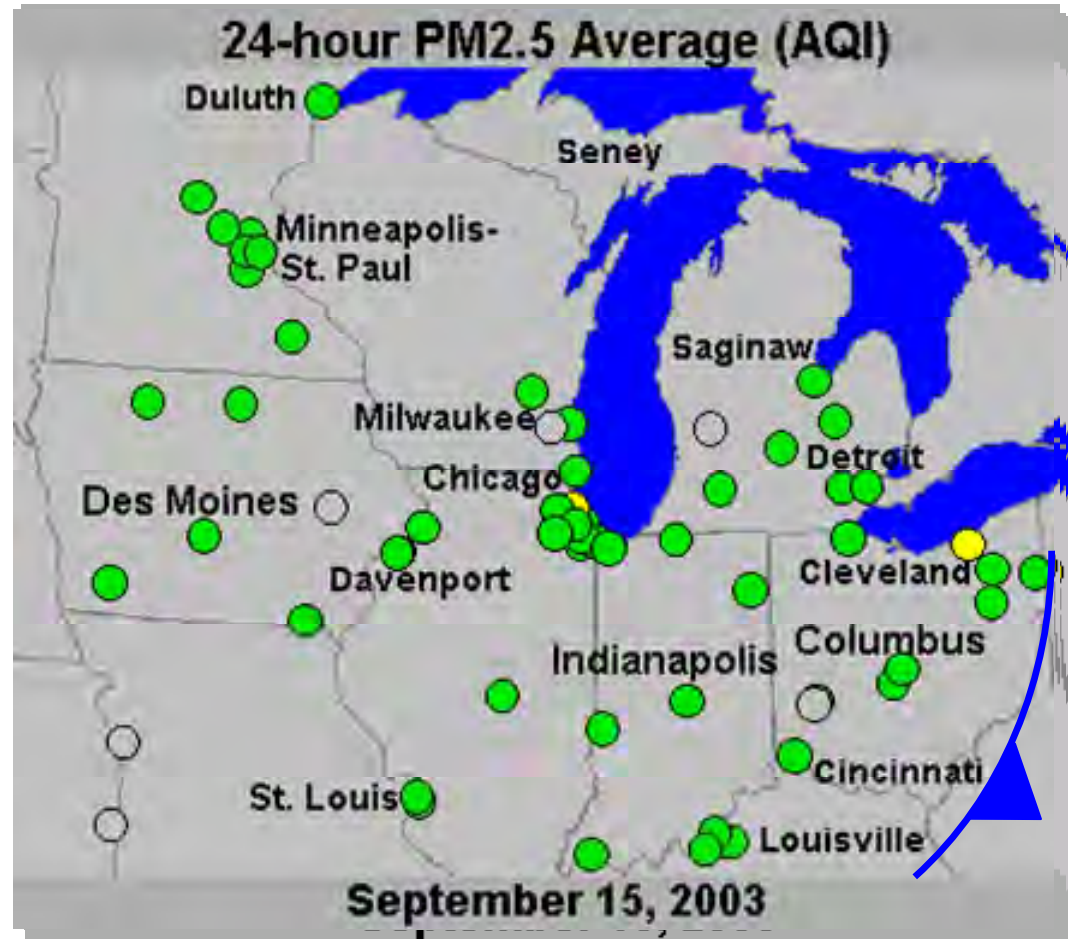
# Masas de Aire y Frentes

Los frentes son regiones donde la atmosfera varía (temperatura, punto de rocío, etc) y hay cambios rápidos en una distancia horizontal pequeña. Los frentes dividen las masas de aire.



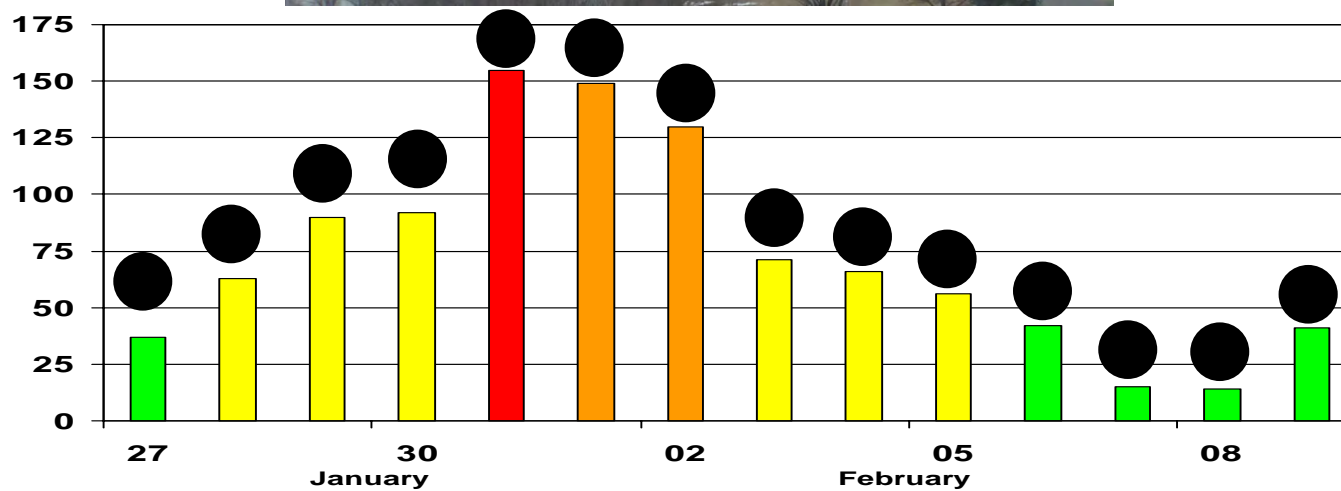
# Masas de Aire y Frentes

- Los frentes y las masas de aire pueden provocar cambios rapidos en la calidad del aire a pocas horas de pasar, particularmente los frentes fríos.
- Los frentes débiles pueden tener de poco impacto a sin impacto; sin embargo, el incremento en la convección que causan puede mejorar la calidad del aire
- Un frente estacionario a menudo se asocia con altos niveles de  $PM_{2.5}$

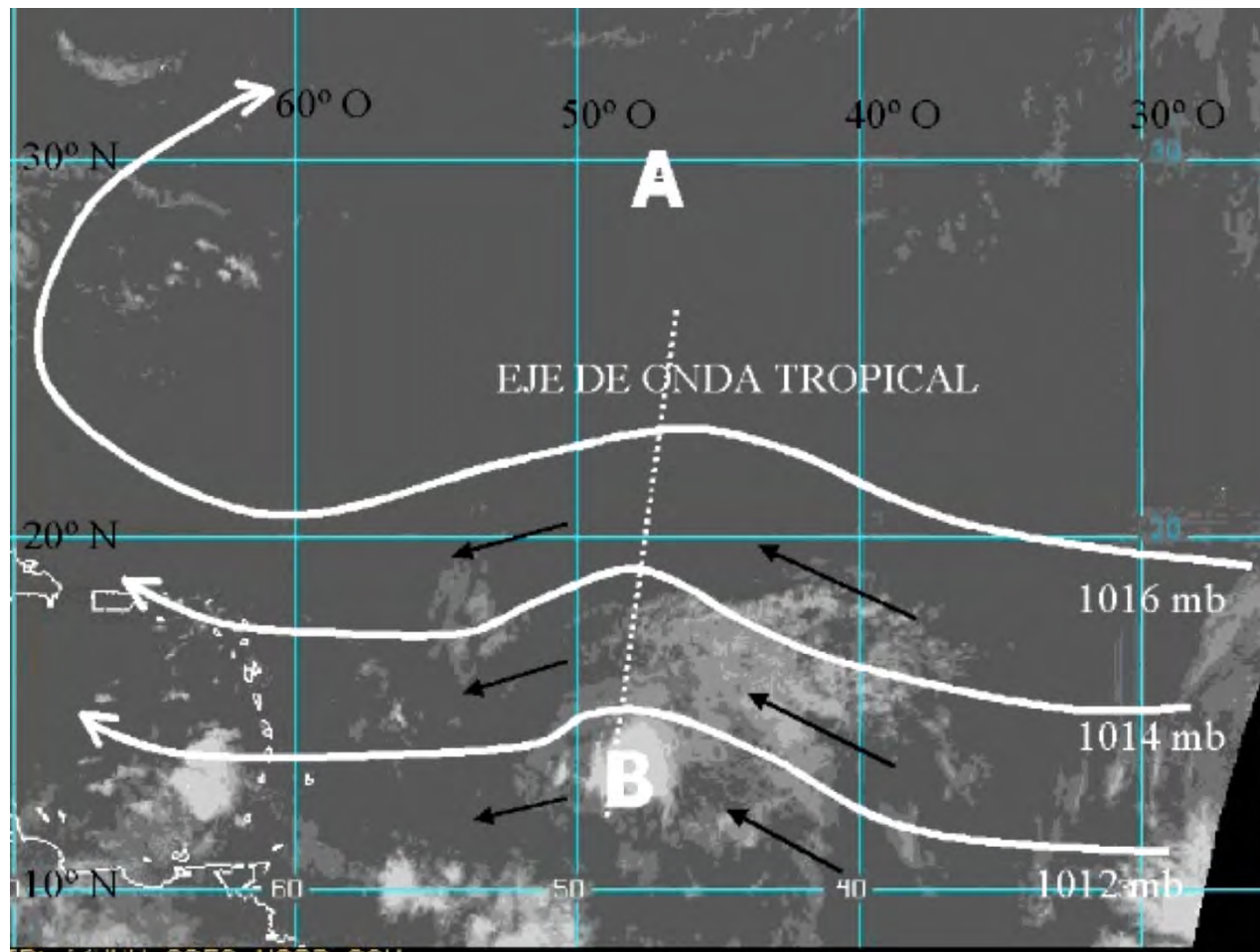


# Masas de Aire y Frentes

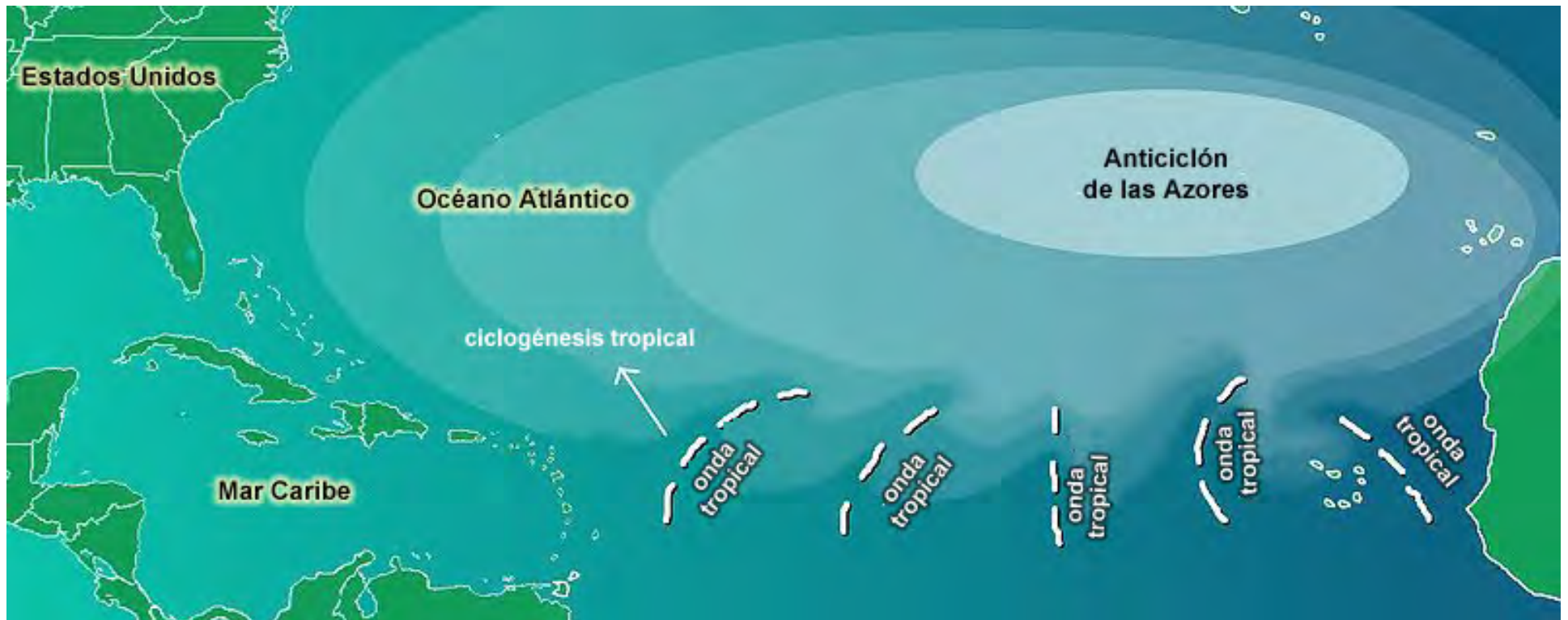
Minneapolis-St. Paul, Minnesota, USA



# Ondas del Este

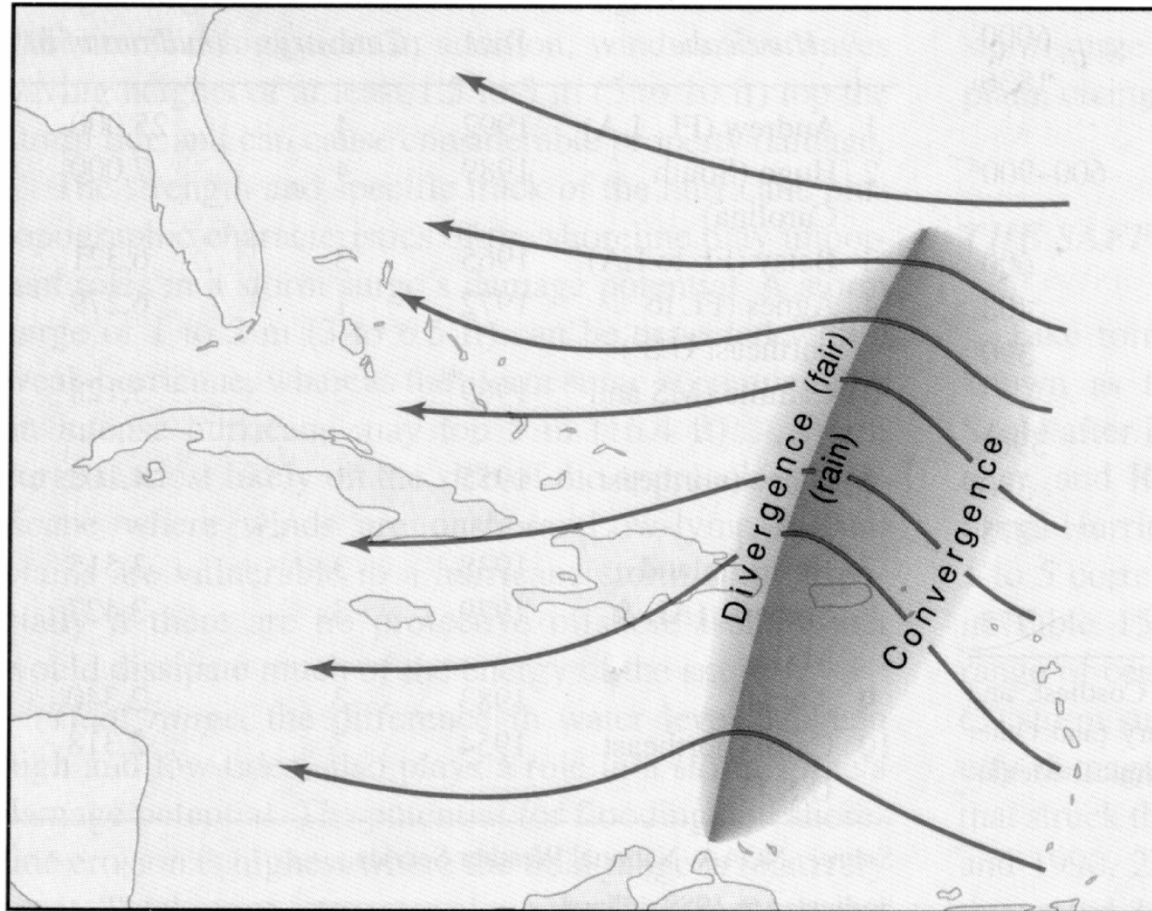


Ondulaciones durante los meses de mayo a noviembre, acompañadas de nubosidad y lluvias de moderadas a intensas. Mayor lluvia al paso del eje de la onda  
Se originan en África



[http://www.meted.ucar.edu/meteoforum/tropwaves\\_sp/print\\_version/trop\\_wave\\_loop.html](http://www.meted.ucar.edu/meteoforum/tropwaves_sp/print_version/trop_wave_loop.html)

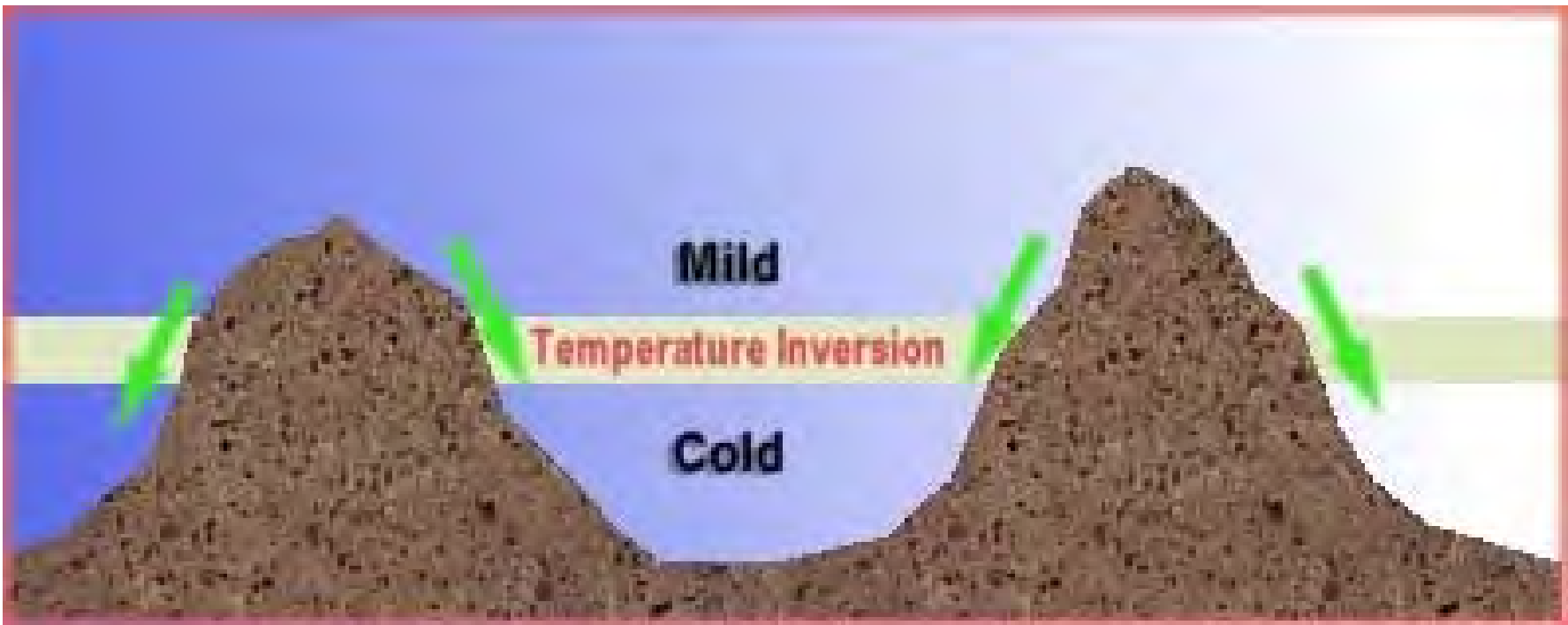
# El flujo del viento y zona de lluvias en las ondas



[http://univision.centennialpr.net/jsp/weather/Huracanes\\_Temas.pdf](http://univision.centennialpr.net/jsp/weather/Huracanes_Temas.pdf)

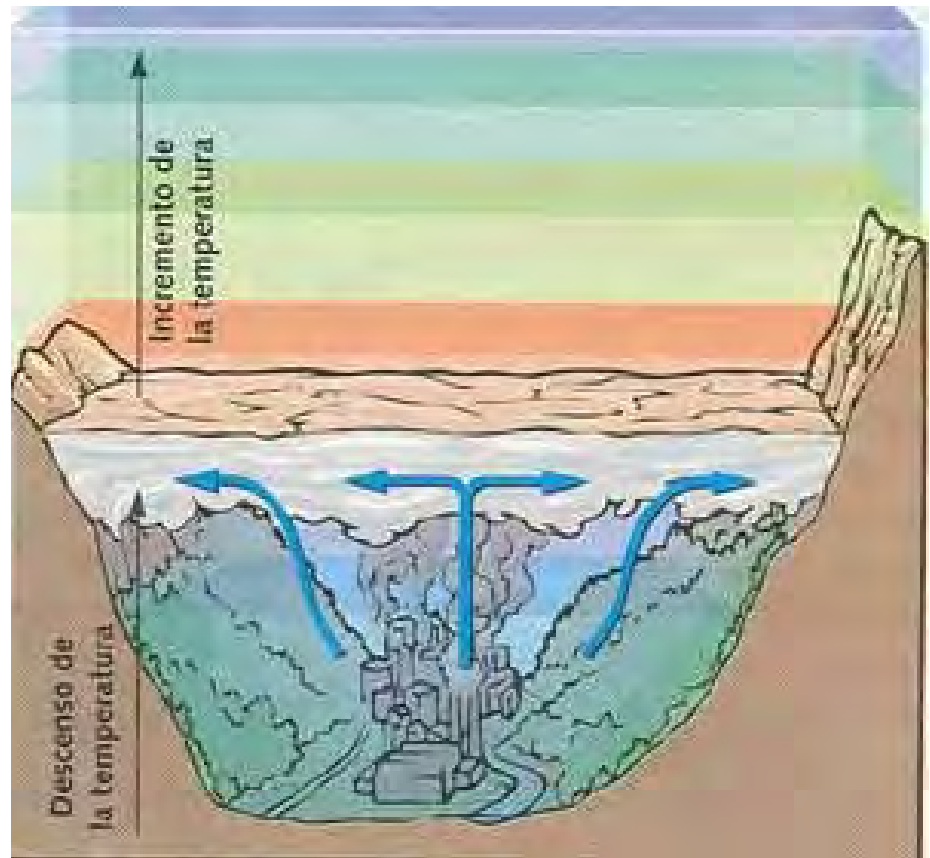
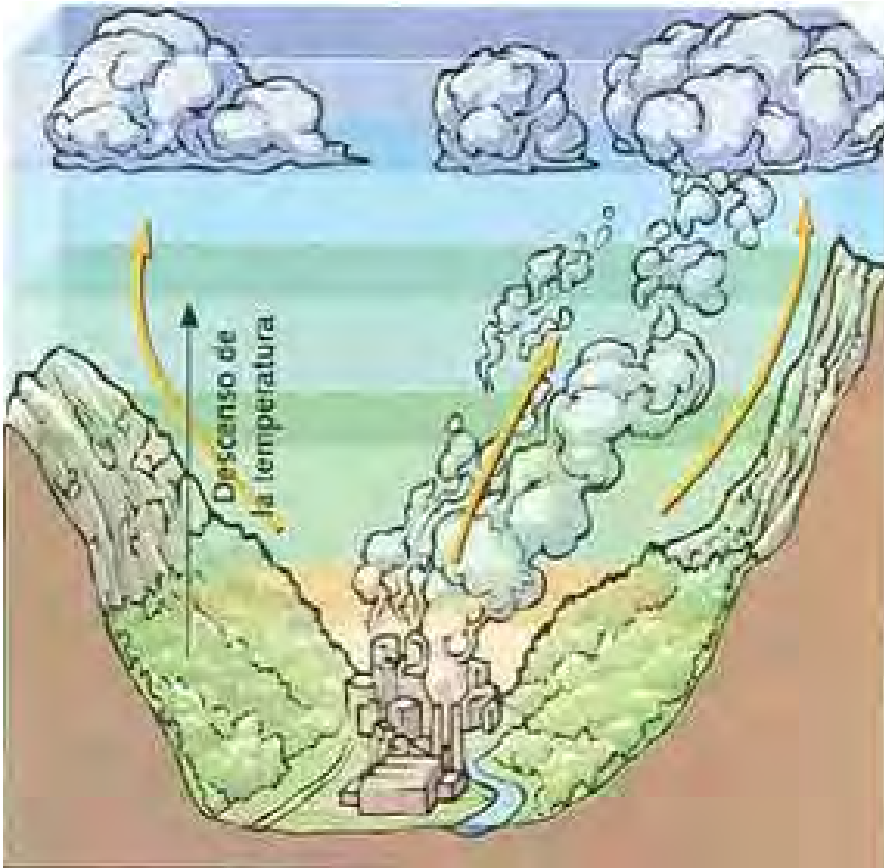
# Inversiones Térmicas

Una capa de aire muy estable sobre una distancia corta vertical producida por aire cálido sobre aire frío.



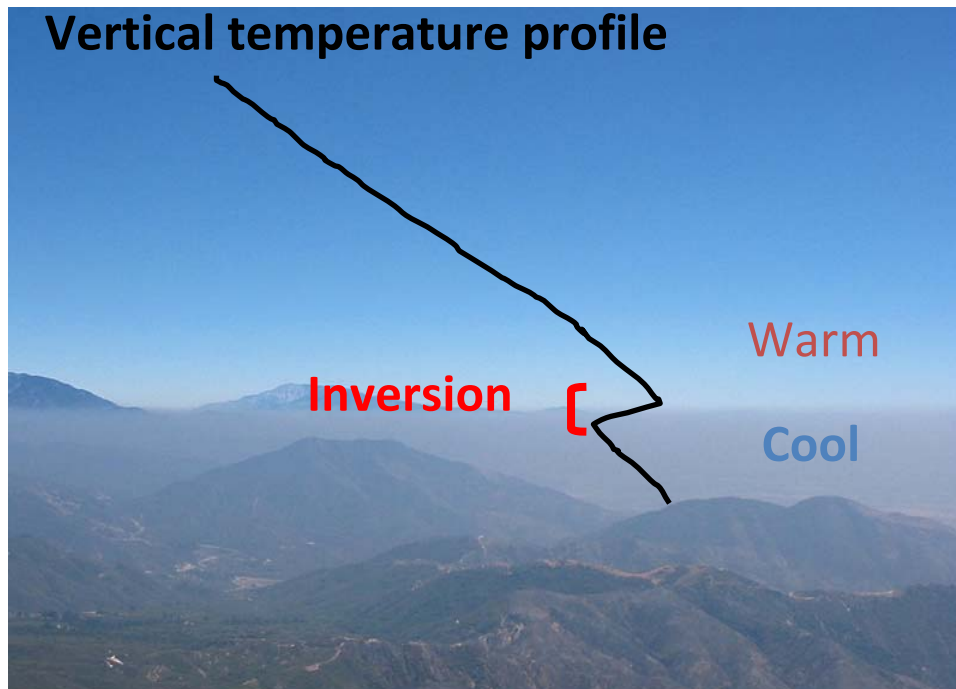
# Inversiones Térmicas

Una inversión térmica puede influir en la dispersión de contaminantes de forma negativa.



# Inversiones Térmicas

Las inversiones son importantes porque suprimen la dispersión vertical de la contaminación y a menudo atrapan los contaminantes cerca de la superficie donde vivimos



Dense fog over the Los Angeles Civic Center, 1955. Note that the buildings project above the base of the inversion layer, while the smog remains below.

# Estabilidad Atmosférica

- Nos ayuda a cuantificar la capacidad de la atmósfera de propiciar o inhibir los movimientos convectivos de aire.
- Para aire seco el gradiente adiabático es
- $\Gamma \equiv g/c_p = 0.976 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$

Gradiente Térmico

$$dT/dz < \Gamma$$

$$dT/dz = \Gamma$$

$$dT/dz > \Gamma$$

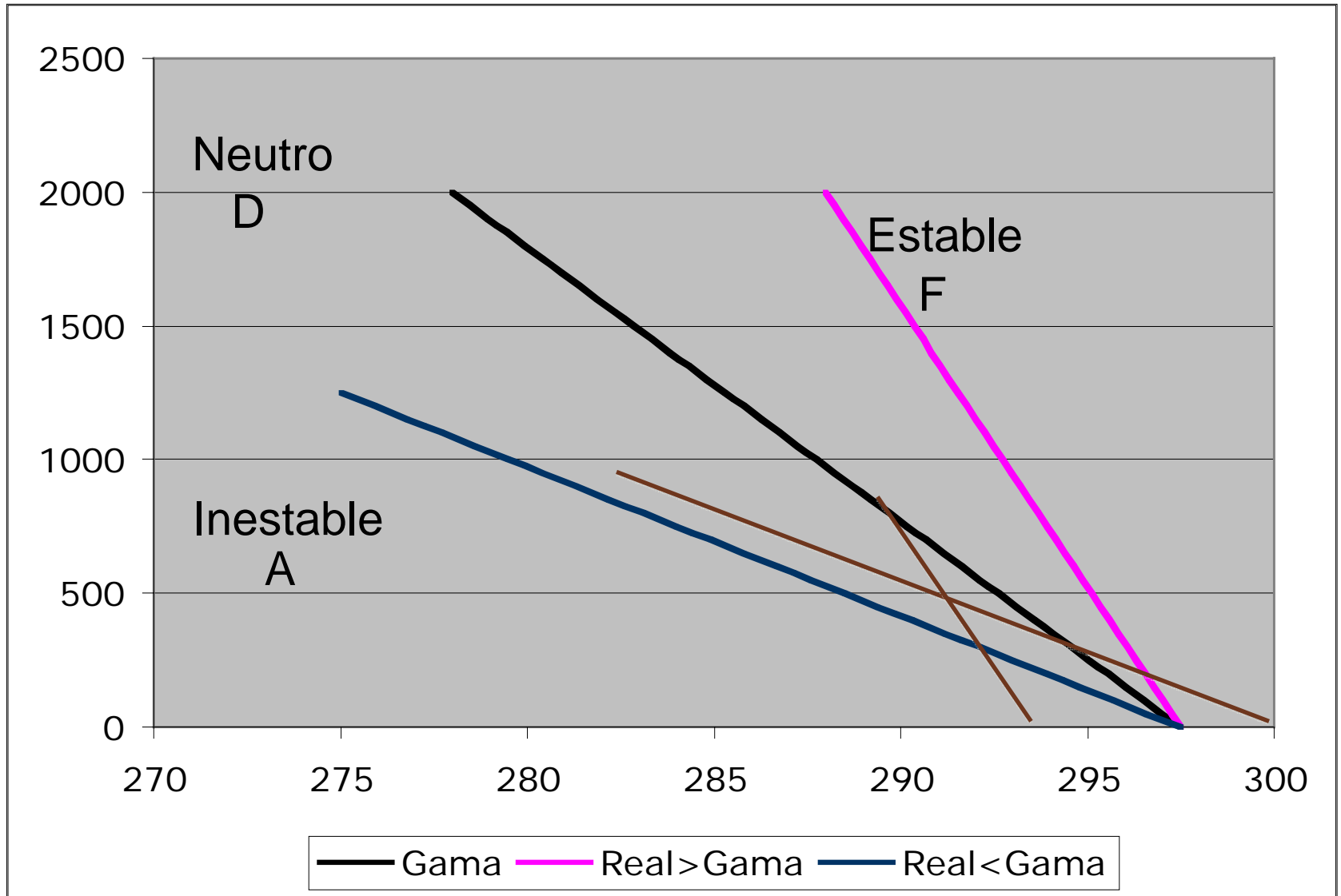
Condición de la atmósfera

Inestable A,B,C

Neutral D

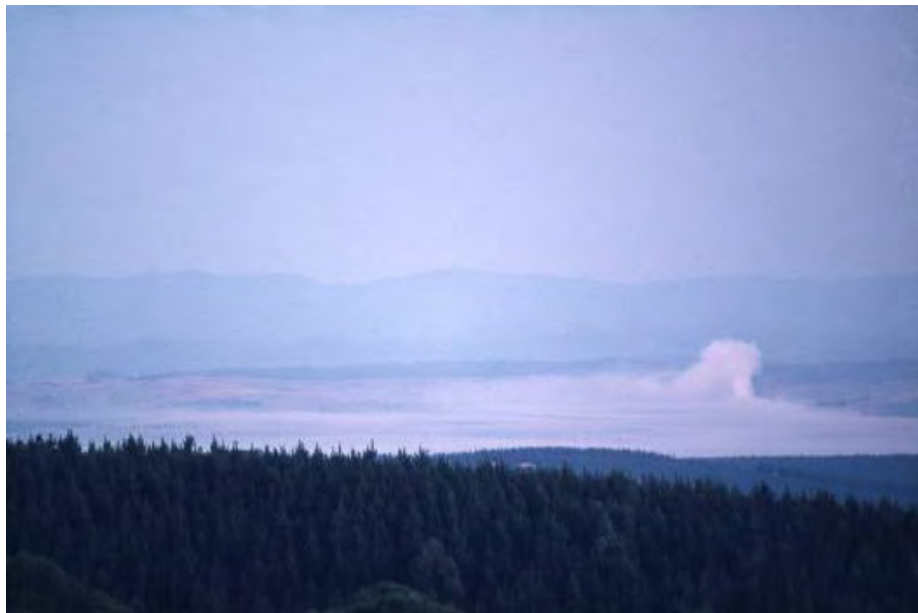
Estable E, F

# Gradiente Adiabático



# Estabilidad

Ejemplos de estabilidad positiva y negativa y su influencia en la emisión de una pluma  
(APM, Latrobe Valley, Victoria, Australia)

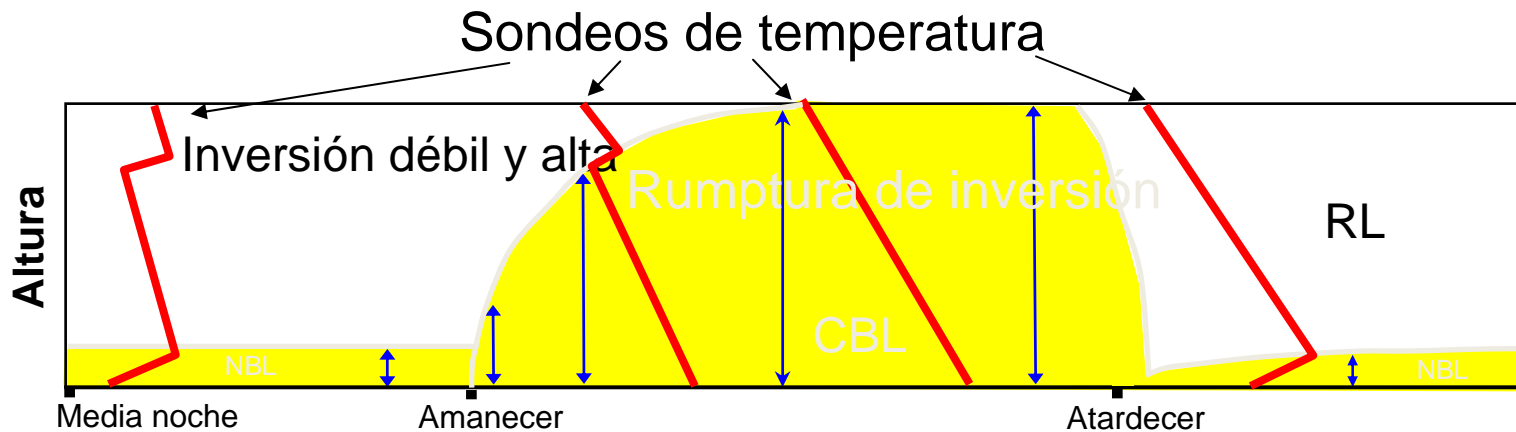


Penacho de emisión de un molino de papel al amanecer

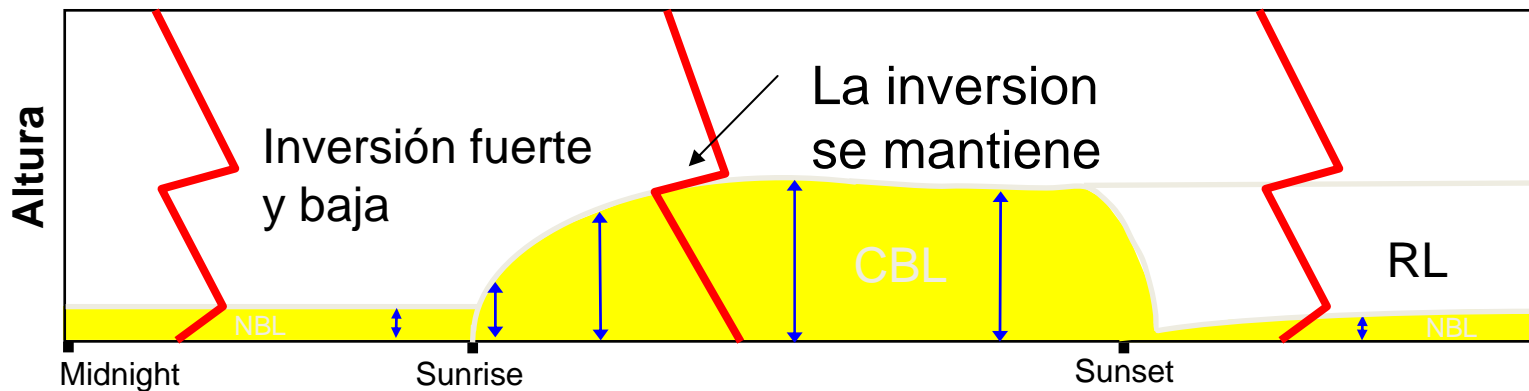


Penacho de emisión de un molino de papel al atardecer 30

# Inversiones, Estabilidad y Mezclado





Los contaminantes se mezclan en un mayor volumen resultando en una disminución de la contaminación



Menor volumen de mezclado resulta en altos niveles de contaminación

RL = Capa Residual  
 CBL = Capa límite convectiva  
 NBL = Capa Límite nocturna

 = profundidad del mezclado basado en superficie  
 = Mezclado vertical basado en la superficie

## Causas de Inversión Térmica

- La radiación. (Enfriamiento rápido de la superficie terrestre durante las noches sin nubes, principalmente)
- La advección. (Transporte de aire frío hacia zonas calientes, superficies acuosas, principalmente)
- La subsidencia. (Descenso de grandes masas de aire normalmente frío, provocado por los sistemas de alta presión.)
- Los fenómenos frontales. (Estos fenómenos meteorológicos propician advección)

# Vientos: Transporte y Dispersión Horizontal

- Escala Sinóptica
  - Los vientos son impulsados por grandes sistemas de alta y baja presión.
- Mesoscale y escala local
  - Crean estancamiento y recirculación
  - Corrientes locales suelen ser difíciles de predecir por los modelos, pero puede ser predichas por meteorólogos con conocimiento de la zona. Tipos
    - Brisas tierra/mar o lago
    - Montaña/valle
    - Forzado por el terreno
    - Ciclos Diurnos
- Superficie vs. capa límite
  - Transporte en diferentes planos verticales
  - Mezclado durante el día afecta a los vientos

# Vientos – Dispersión

¿Cómo los vientos afectan la contaminación?

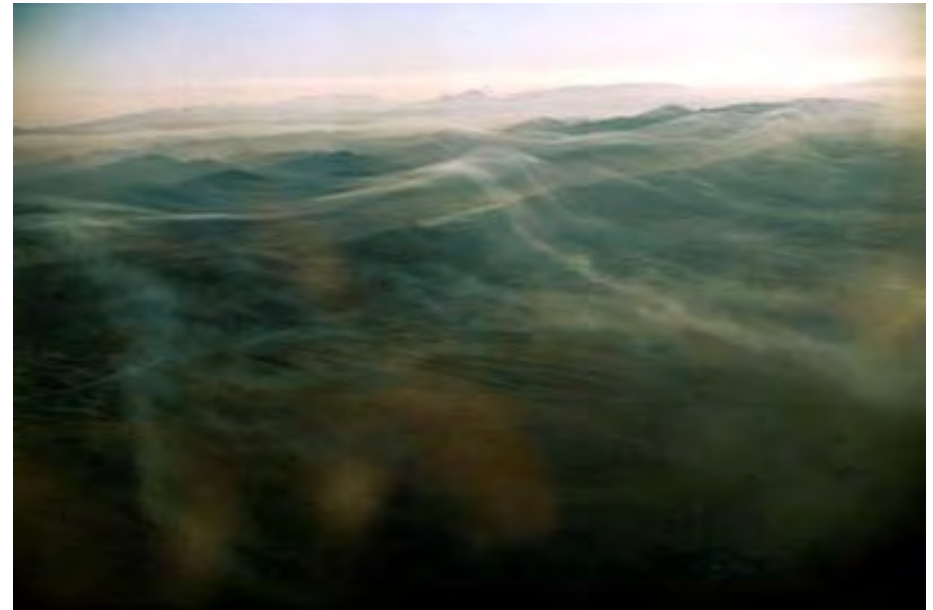
- Dispersan los contaminantes
- La dispersión es un proceso de dilución
  - Difusión Molecular (no eficiente)
  - Turbulencia Atmosférica
    - Mecánica
    - Cizalla
    - Flotación (convectiva)



# Vientos – Transporte

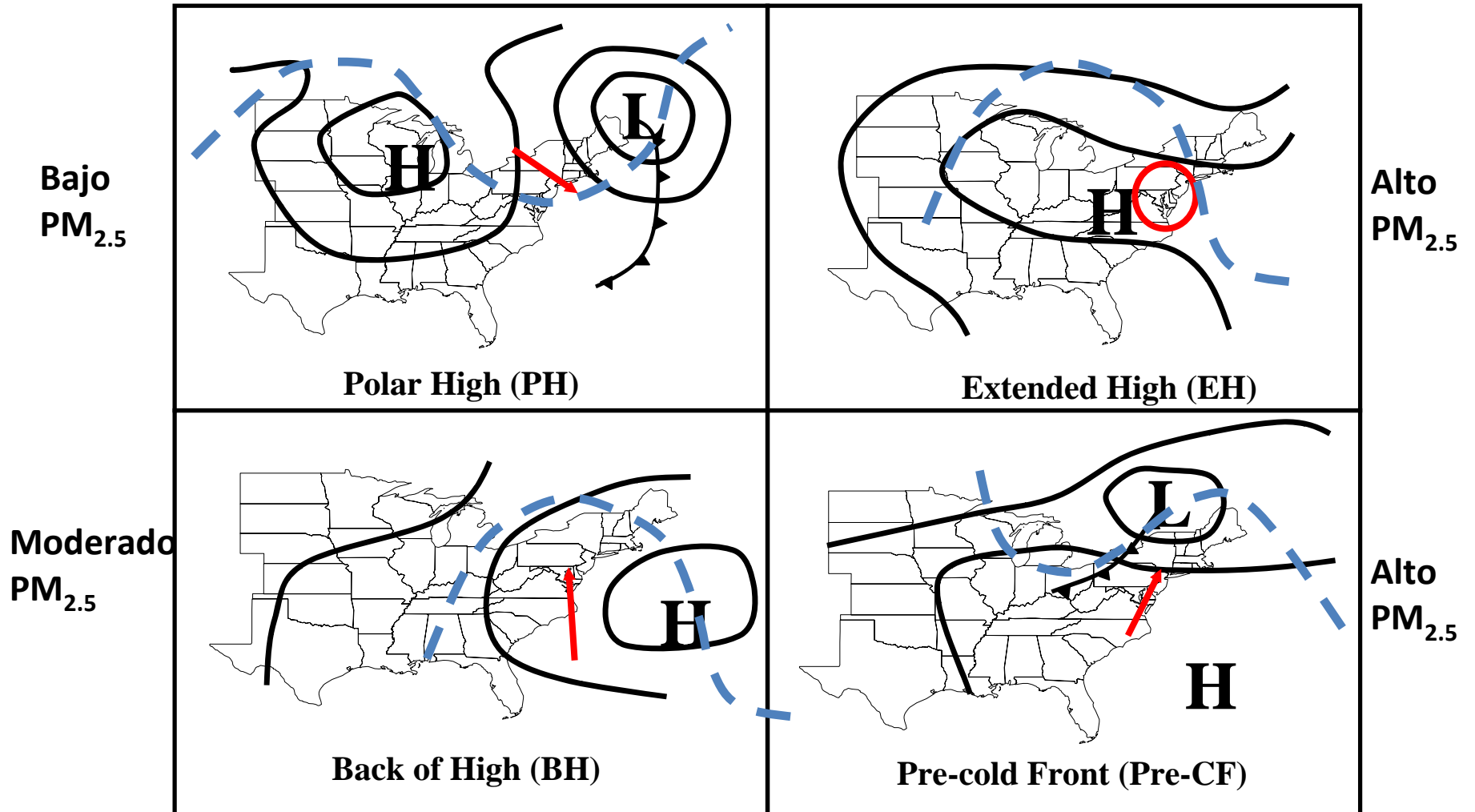
¿Cómo los vientos afectan la contaminación?

- Transporte de contaminantes – los contaminantes se desplazan de un lugar a otro por el viento.
- Tipos
  - Escala residencial: monitor a monitor
  - Escala regional: ciudad a ciudad y edo. a edo.
  - Escala nacional: país a país
  - Escala global: continente a continente



Transporte de contaminantes de Los Angeles Basin a el desierto Mojave  
(Courtesy of Don Blumenthal)

# Transporte – Escala Regional

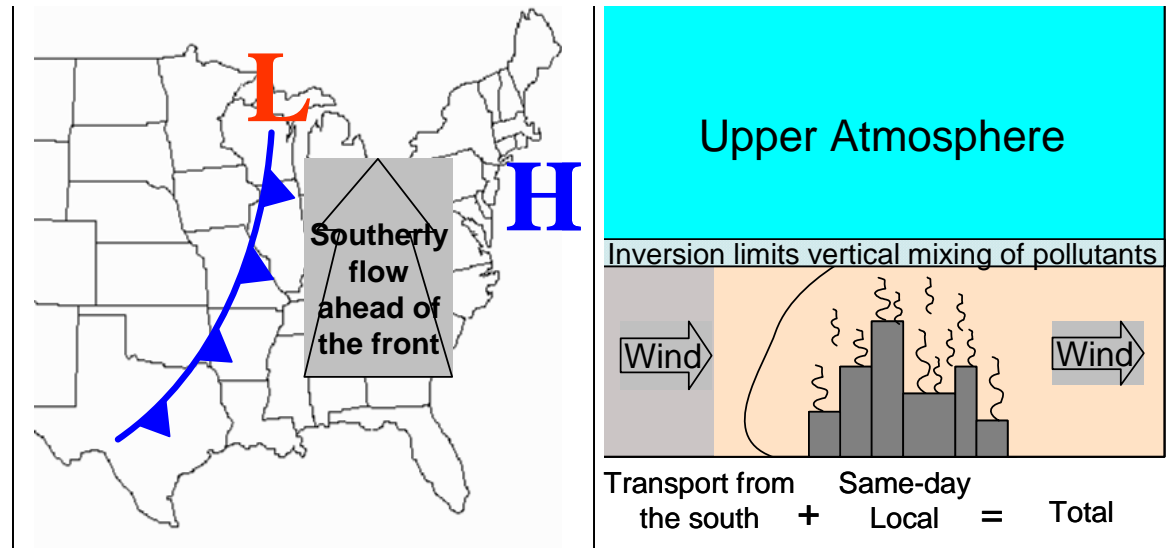


-  Isobaras
-  Línea de 500-mb
-  Flujo superficial sinóptico

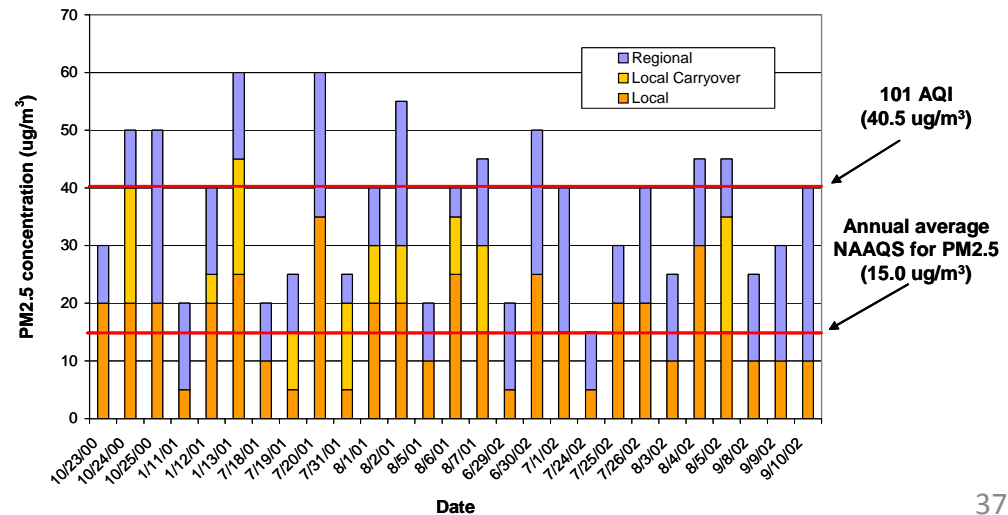
Comrie and Yarnal, 1992

# Transporte – Escala Regional

Altas concentraciones de contaminantes viento arriba pueden transportarse a un área diferente y con ello causar incrementos sustanciales



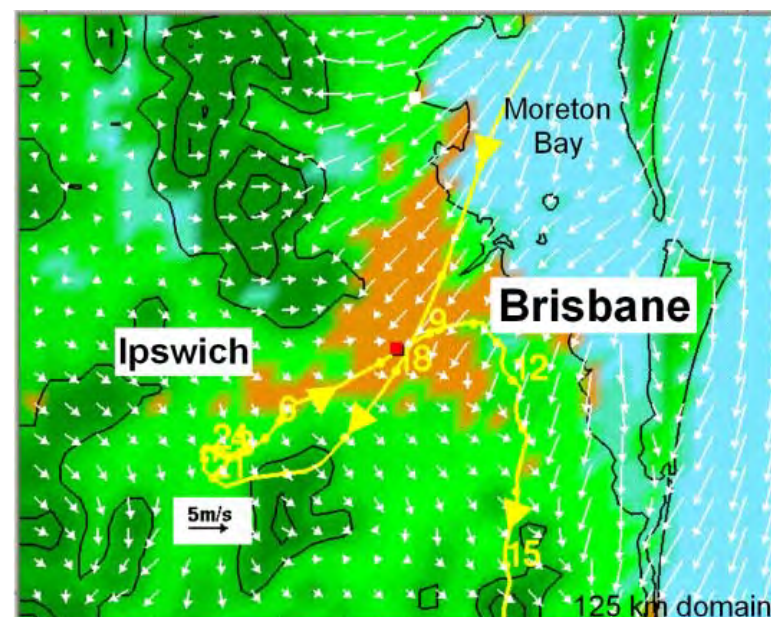
Approximate PM<sub>2.5</sub> contributions



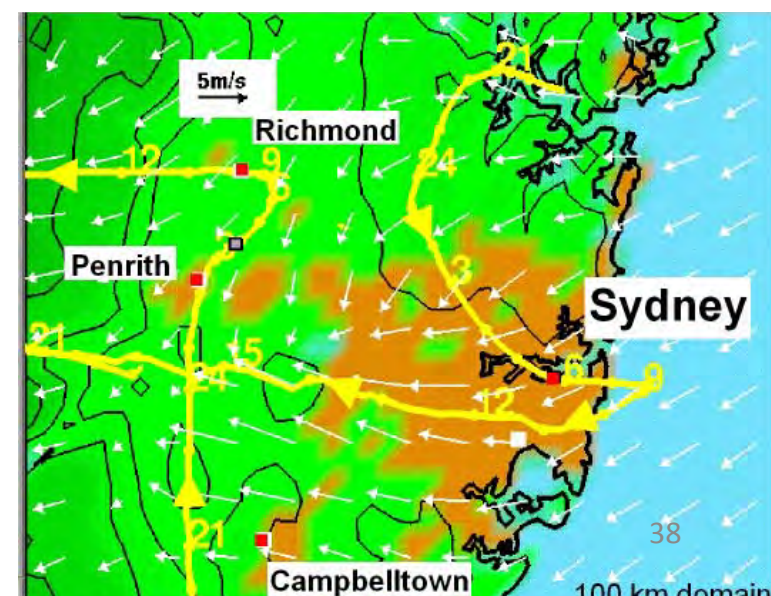
Chinkin et. al., 2003

## Recirculación por Brisa Marina

Los vientos a la 1:00 pm y las trayectorias calculadas de las parcelas de aire en Brisbane, para un día de verano típico. La brisa de mar trae las emisiones urbanas durante la noche y la mañana de regreso las emisiones de la ciudad desde el mar y de tierra adentro, para recircularse durante la noche siguiente, posiblemente hacia Gold Coast

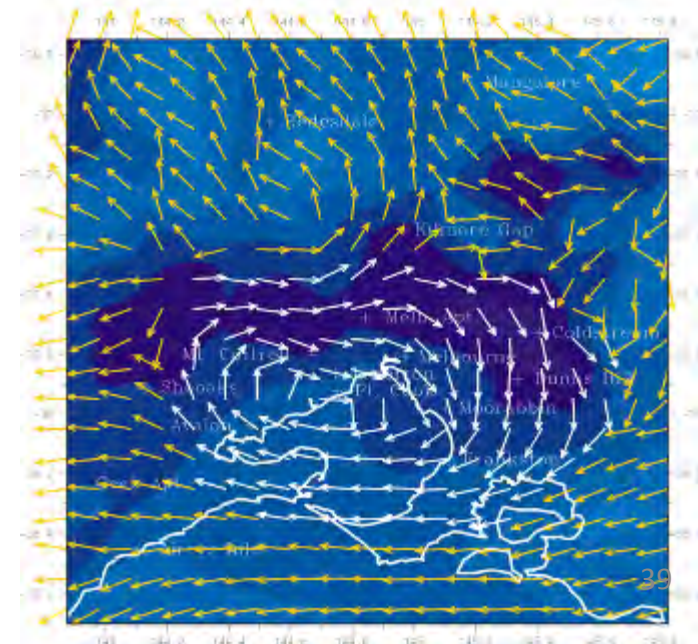
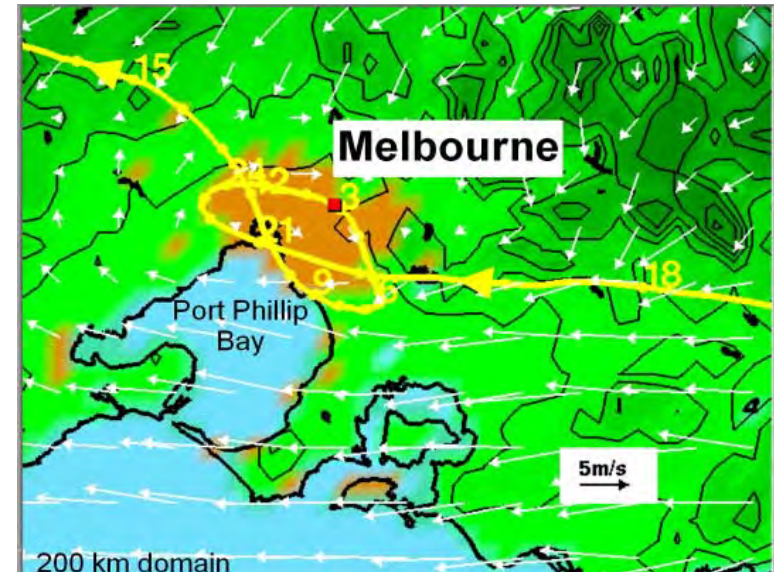
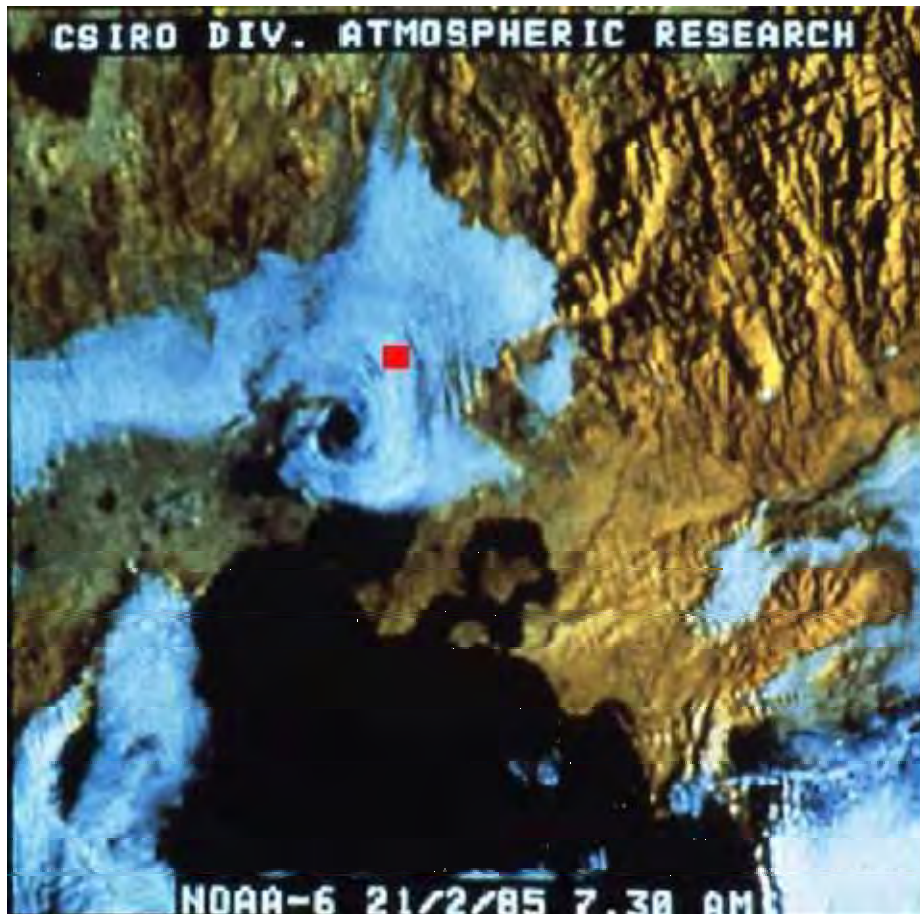


Las trayectorias sobre Sidney en un día de verano con alta contaminación muestra una complejidad considerable como los flujos de desahogue de las laderas interactúan y son reemplazados con brisas de mar. A las 3 pm los vientos de superficie llevan a la contaminación del aire a los suburbios. Costa occidental.



# Recirculación por Brisa Marina

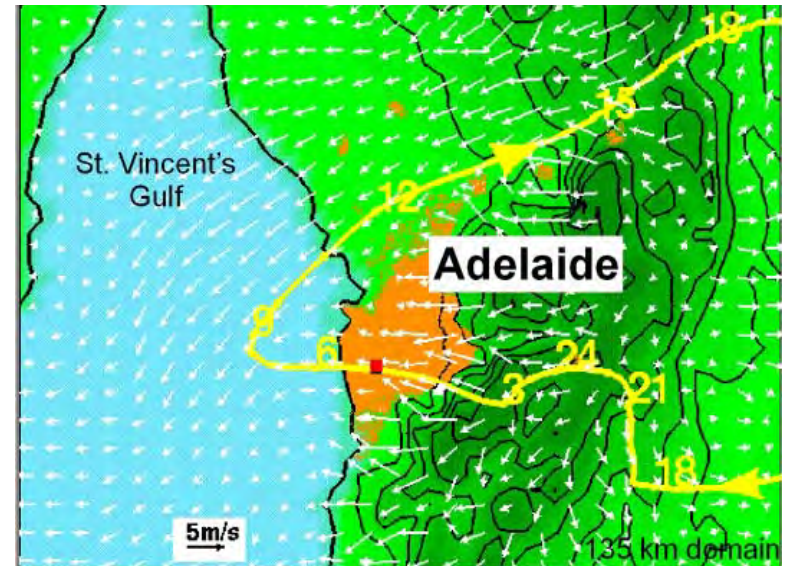
Los vientos de la mañana sobre Melbourne en un día típico de alerta por contaminación. La trayectoria calculada muestra cómo el aire contaminado es atrapado y recirculado conforme el día avanza. Los cálculos se asemejan a lo observado.



# Recirculación por la Brisa Marina

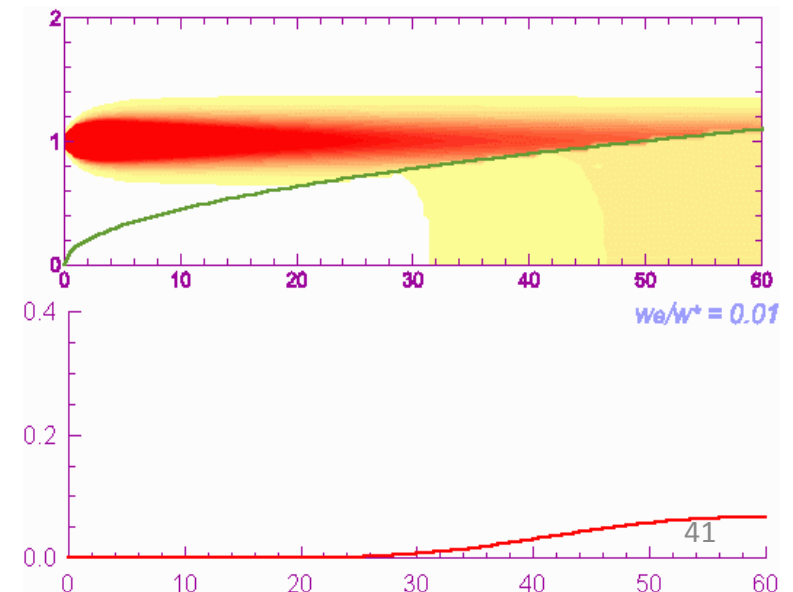
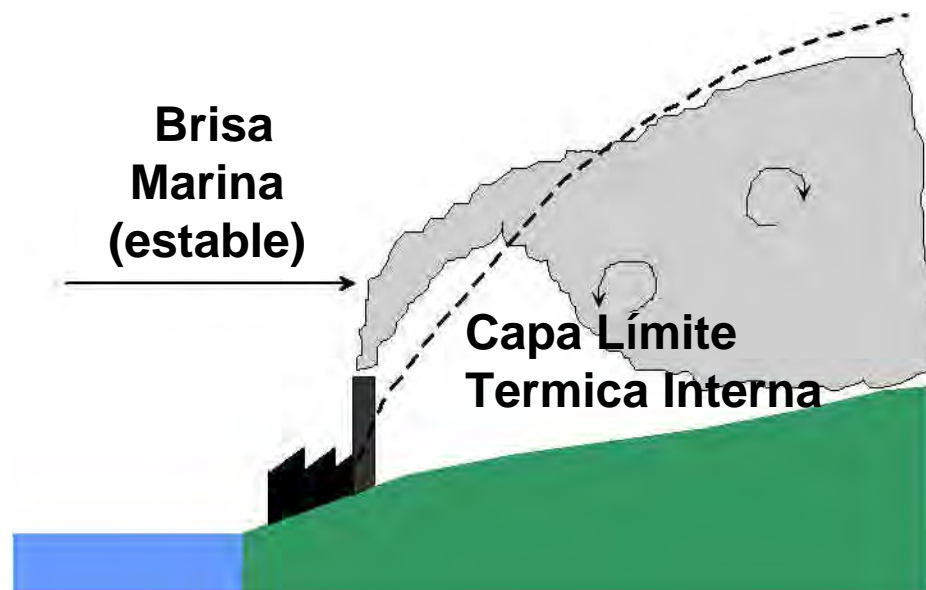
Condiciones desfavorables de dispersión de contaminantes pueden darse en Adelaide bajo vientos débiles del nordeste y temperaturas cálidas. Una brisa marina del suroeste-oeste se genera a media mañana, regresando las emisiones pico de la madrugada a la ciudad y los suburbios a medio día.

Los vientos de las 2:30 pm, y una trayectoria de aire muestran cómo en los días con brisa del oeste, el aire contaminado se devuelve desde el mar al área de Perth. Durante la noche, el mismo aire se vuelve desde el interior cuando re-establece la brisa de tierra.



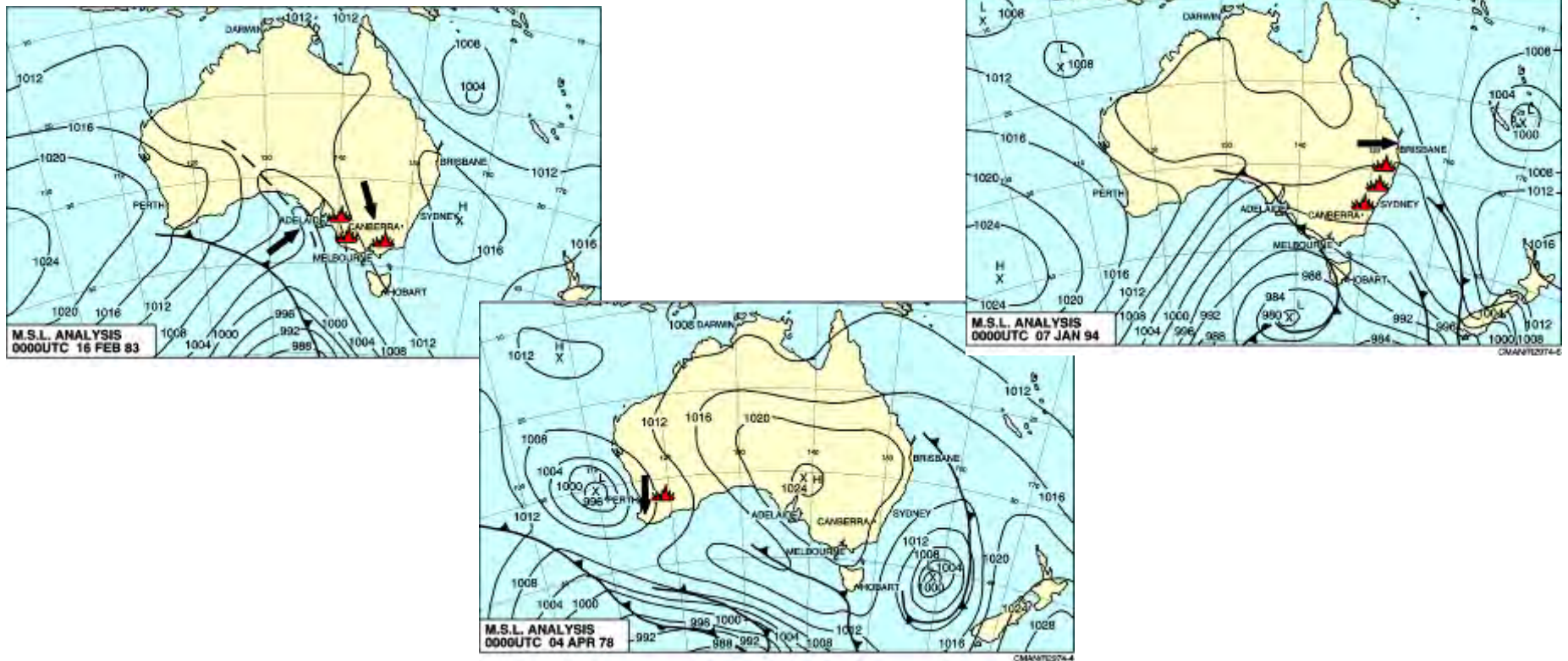
# Calentamiento y vientos- Fumigación brisa marina

- La advección del aire marino frío a tierra dentro por la brisa marina; el aire se calienta desde abajo debido a la superficie terrestre caliente.
- Se forma la capa límite térmica interna (TIBL)
- La fumigación ocurre cuando se liberan contaminantes en la masa estable marina y se encuentran con la TIBL, y se mezclan hacia la superficie por un movimiento convectivo.
- La TIBL actúa como una tapa.



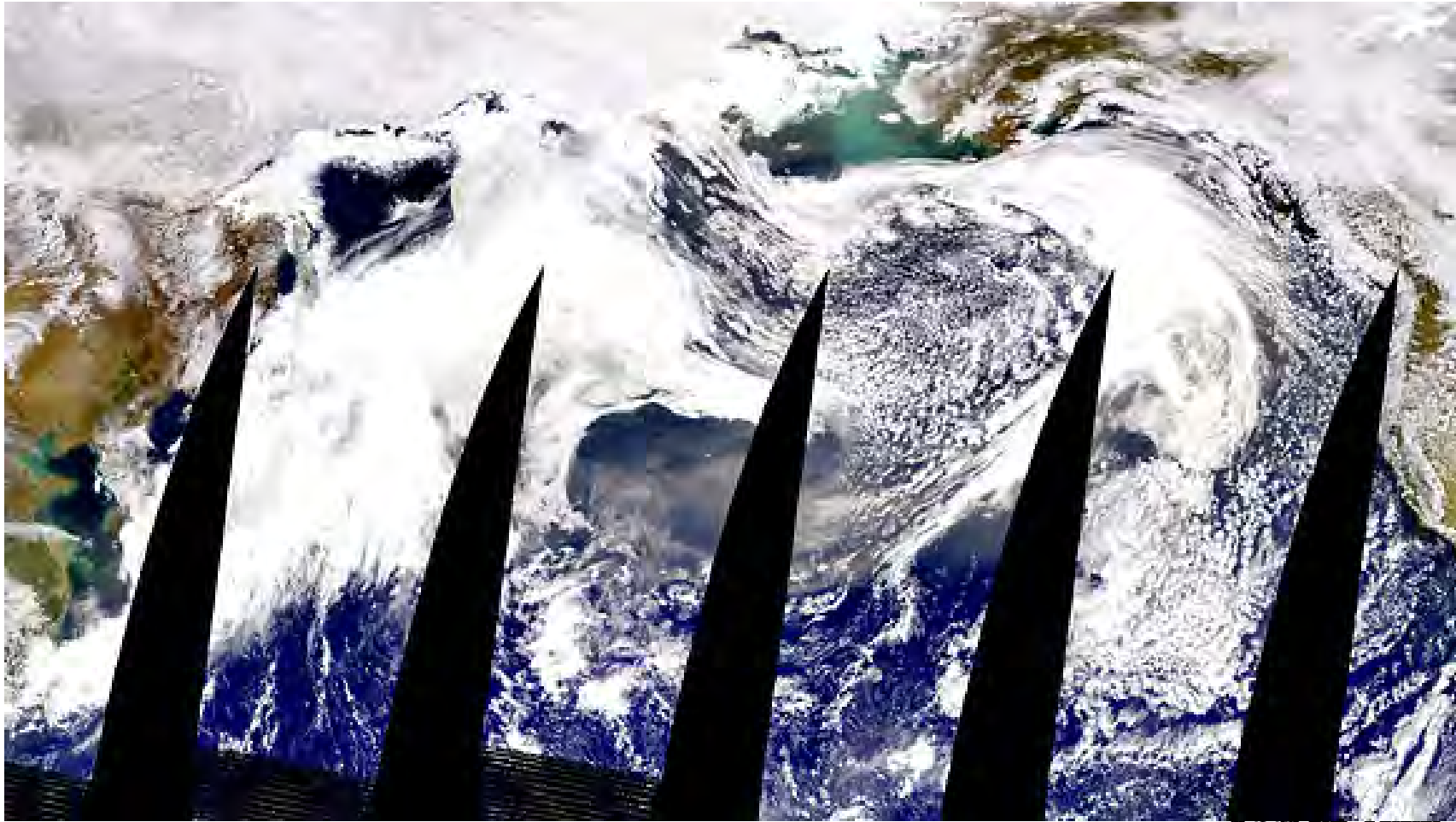
# Vientos y Fuego a Escala Sinóptica

Condiciones meteorológicas (izq) 16 febrero 1983, (der) fuegos en Sydney, enero 1994, y (abajo) fuegos en la región Perth, 1978



Los incendios más devastadores en Australia en los últimos años se ha producido durante los períodos de vientos fuertes calientes procedentes del centro del continente después de un prolongado periodo de lluvias baja

# Transporte – Escala Global



April 23, 1998

## Transporte de polvo asiático a través del Pacífico

Image from [http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN\\_DOCS/OCDST/asian\\_dust\\_sequence.html#apr\\_20](http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/OCDST/asian_dust_sequence.html#apr_20) and "The Asian Dust Events of April 1998" by Husar and 28 co-authors (Journal of Geophysical Research - Atmospheres, 106 (D16), 18317-18330, August 27, 2001) discusses these events.

# Tolvaneras

¿Cómo el viento afecta a la contaminación?

- Crea contaminación – mediante tolvaneras
- Requisitos
  - Suelo /tierra polvorienta
  - Vientos de 17 mph pueden levantar el polvo

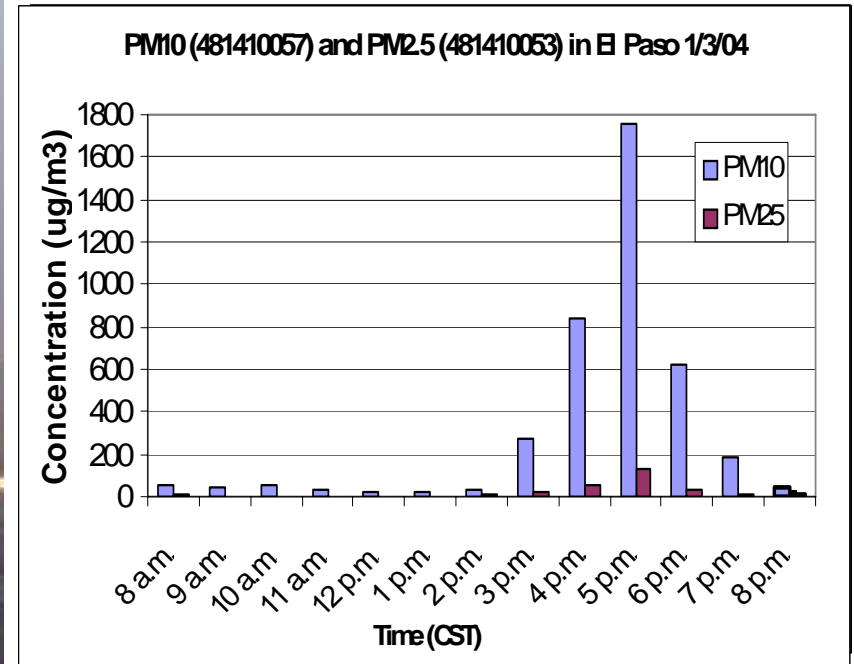
Velocidad umbral de viento para ambientes desérticos diferentes

| Land Environment                                     | Threshold Wind Speed |
|--|----------------------|
| Fine to medium sand in dune-covered areas            | 10-15 mph            |
| Sandy areas with poorly developed desert pavement    | 20 mph               |
| Fine material, desert flats                          | 20-25 mph            |
| Alluvial fans and crusted salt flats (dry lake beds) | 30-35 mph            |
| Well-developed desert pavement                       | 40 mph               |



Source: <http://meted.ucar.edu/mesoprim/dust/frameset.htm>

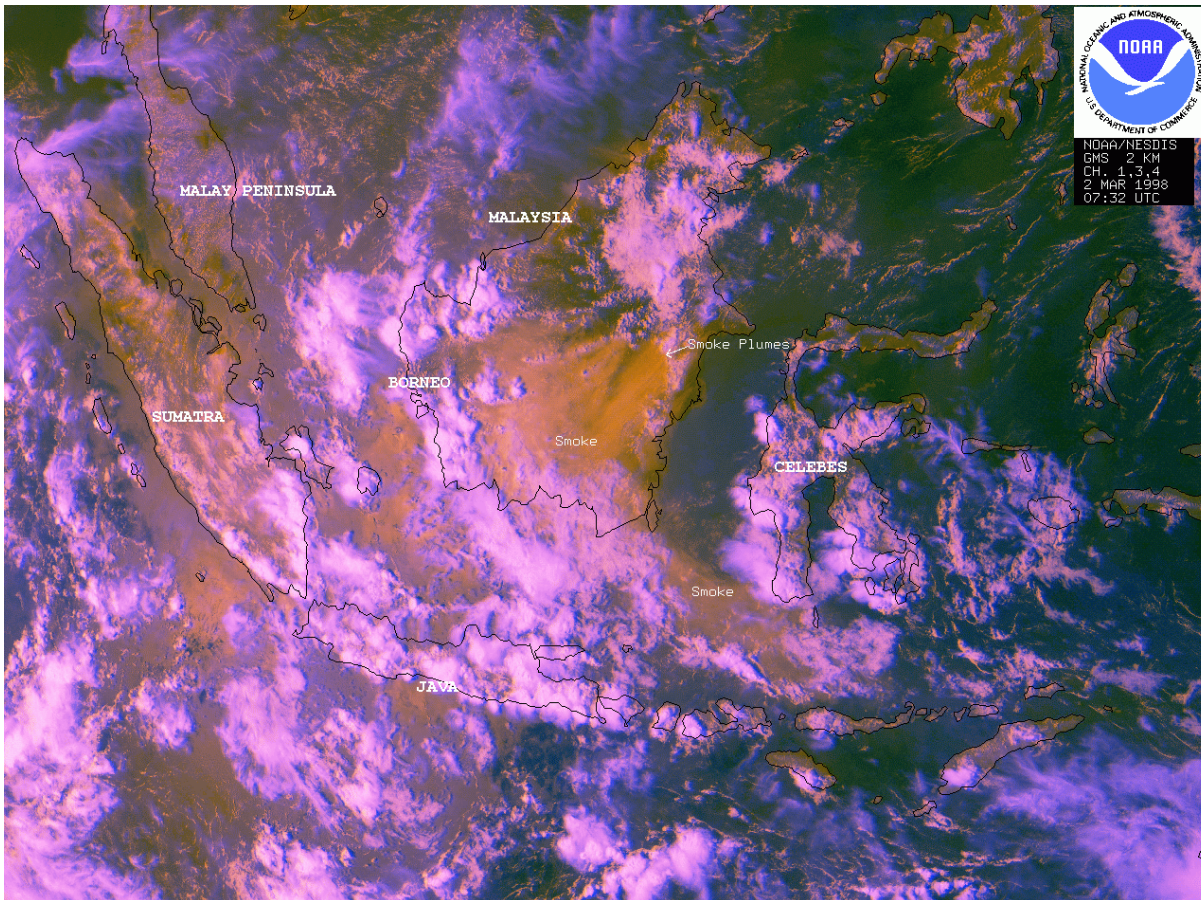
# Tolvaneras



Tolvanera en enero, 2004, 11:00 a.m. to 5:30 p.m.,  
El Paso, Texas, USA

Source: TCEQ

# Humo



- Plumas de humo(naranja) de fuegos de biomasa sobre Borneo en 1998 se transportaron hacia el suroeste por los vientos alisios premonacales sobre la región en esa época del año.
- Sequía, causada por El Niño, resultó en la mayor quema de biomasa

# Nubes y Precipitación

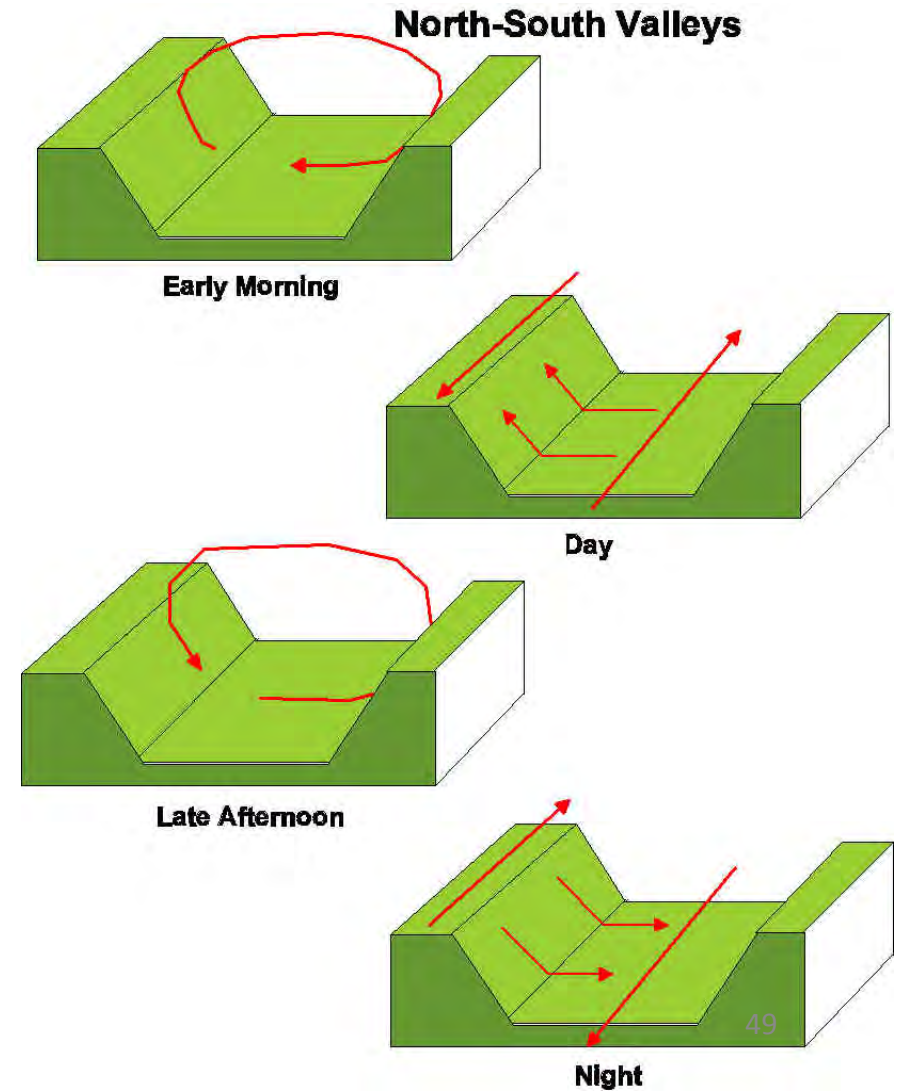
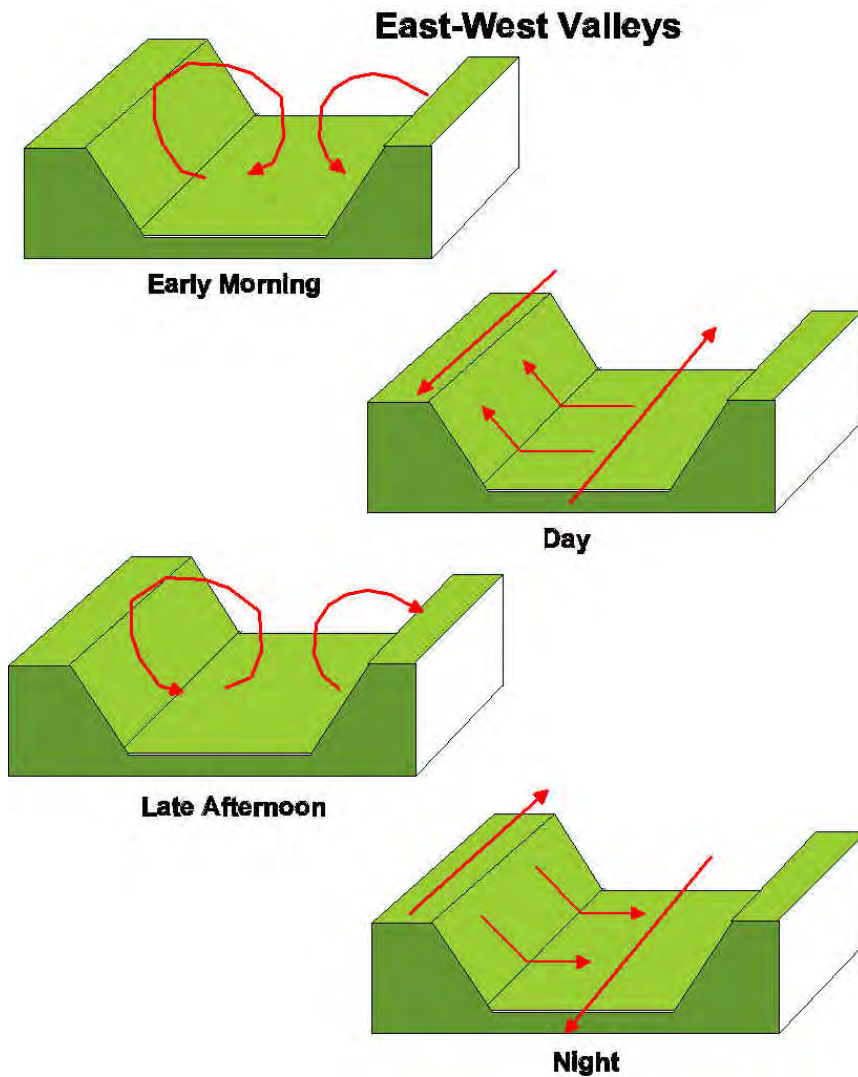
- Se forman nubes cuando el aire se satura
  - Adicionando vapor de agua
  - Enfriando el aire
- Muchos procesos agregan vapor de agua o enfrían
  - Movimiento ascendente
    - Convección
    - Calentamiento diurno
    - Frente frío que eleva aire caliente (o vice versa)
    - Orografía
  - El aire en contacto con la superficie se enfría
  - Aire desplazándose sobre el agua
  - Otros

## Nubes y Precipitación

- Las nubes y la neblina pueden aumentar la conversión de  $\text{SO}_2$  a sulfato de 1% a 50% por hora
- La precipitación remueve  $\text{PM}_{10}$  pero tiene poco impacto en  $\text{PM}_{2.5}$
- Las nubes convectivas pueden desfogar la contaminación de la capa límite bajo condiciones estables.
- Las nubes reducen el calentamiento superficial y la capacidad para romper la capa de inversión.

# Calentamiento y Vientos – Escala Local

## Viento Catabatico y de Pendiente



# Meteorología y Partículas

## Cómo afecta el clima a las emisiones de PM, la formación y el transporte

| Fenómeno                           | Emisiones   | Formación de PM  | PM Transporte/pérdidas   |
|------------------------------------|---|--|--|
| <b>Patrón de presión en Altura</b> | Ningún Impacto Directo  | Ningún Impacto Directo   | Las crestas tienden a producir condiciones de acumulación de PM <sub>2.5</sub> . Valles tienden a producir condiciones que favorecen la dispersión y remoción de PM y ozono. En las regiones valle montaña, strong wintertime inversions and high PM <sub>2.5</sub> levels may not be altered by weak troughs. High PM <sub>2.5</sub> concentrations often occur during the approach of a trough from the west.                            |
| <b>Vientos y Transporte</b>        | Ningún Impacto Directo  | En general, los vientos intensos dispersan los contaminantes, dando como resultado una mezcla menos ideal de contaminantes para las reacciones químicas que producen PM <sub>2.5</sub> .   | Vientos intensos en superficie tienden a dispersar las PM <sub>2.5</sub> independientemente de la temporada. Vientos intensos pueden levantar polvo incrementando la concentración de PM <sub>2.5</sub> .  |
| <b>Inversión de Temperatura</b>    | Ningún Impacto Directo  | Las inversiones reducen el mezclado vertical y, por lo tanto, aumentan las concentraciones de precursores químicos de PM. Las concentraciones altas de precursores pueden producir reacciones químicas más rápidas y eficientes que producen PM <sub>2.5</sub> . | Una inversión fuerte limita el mezclado vertical lo que permite la acumulación de PM <sub>2.5</sub> .  |
| <b>Lluvia</b>                      | Reduce las emisiones por suelo y fuego  | La lluvia puede remover precursores de PM <sub>2.5</sub> .   | La lluvia puede remover PM <sub>2.5</sub> .  |
| <b>Humedad</b>                     | Ningún Impacto Directo  | La humedad contribuye en la producción de PM <sub>2.5</sub> secundario incluyendo sulfatos y nitratos  | Ningún Impacto Directo   |
| <b>Temperatura</b>                 | Temperaturas cálidas están asociadas con incremento en evaporación, emisiones biogénicas y de generación de energía, que actúan para incrementar PM <sub>2.5</sub> . Temperaturas bajas también pueden indirectamente influir en las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> (i.e., calefacción durante la noche). | Aumenta la velocidad de reacción fotoquímica con la temperatura.   | Aunque las temperaturas superficiales cálidas son generalmente asociadas con una baja calidad del aire, temperaturas muy cálidas pueden incrementar el mezclado vertical y la dispersión de los contaminantes. Las temperaturas cálidas pueden volatilizar los nitratos de sólido a gas. Las temperaturas muy frías en el invierno pueden producir inversiones fuertes en superficie que pueden confinar los contaminantes en capas bajas. |
| <b>Nubes/Niebla</b>                | Ningún Impacto Directo  | Water droplets can enhance the formation of secondary PM <sub>2.5</sub> . Clouds can limit photochemistry, which limits photochemical production.  | Las nubes convectivas son indicadoras de un mezclado vertical intenso, el cual dispersa los contaminantes.   |
| <b>Temporada</b>                   | Incendios forestales, quema de madera, agrícolas, campos de cultivo, carreteras sin pavimentar, obras de construcción, actividades que varían por temporada   | The sun angle changes with season, which changes the amount of solar radiation available for photochemistry.   | Ningún Impacto Directo   |