

Micrometeorología y Microclimatología

Andrew S. Kowalski
Catedrático
Dpto. Física Aplicada
Universidad de Granada
andyk@ugr.es

Enrique Pérez Sánchez-Cañete
Profesor Contratado Doctor
Dpto. Física Aplicada
Universidad de Granada
enripsc@ugr.es

Calendario

- Lecciones de teoría (y problemas)
 - Martes y Jueves 9:30 – 11:30
 - Aula P04– ETS Ing. Edificación, Campus de Fuentenueva (planta -1, patio)
- Seminario particular (Ceulemans)
 - martes 21 de abril, 10:30
 - "Short-rotation forestry for bio-energy reduces greenhouse gas emissions and contributes to climate change mitigation"
- Tutoría
 - Andy: Lunes y Viernes, 9-12
 - Enrique: Lunes y Viernes, 9-12

Lecciones en formato PDF

- www.ugr.es/~andyk

→ Docencia → Micromet/Microclim

Bibliografía

- Stull, R. B., An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1989, ISBN 90-277-2769-4
- Garratt, J. R., The atmospheric boundary layer, Cambridge, University Press, 1992
- Foken, T., Micrometeorology, Springer, 2008, ISBN 978-3-540-74665-2
- Oke, T. R., Boundary Layer Climates, Cambridge University Press, 1978
- Arya, S. P., Introduction to Micrometeorology, Academic Press, 1988, San Diego
- Kaimal, J. C., & Finnigan, J. J., Atmospheric Boundary Layer Flows, Oxford University Press, 1994
- Lee, X., Massmann, W., & Law, B., Handbook of Micrometeorology, Kluwer Academic Press, 2004
- Lee, X., Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology, Springer, 2018, ISSN 2194-5217,
- Holton, J. R., An Introduction to dynamic meteorology, Elsevier, 2004.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V., Atmospheric Science: An Introductory Survey; Elsevier, 2006.

Evaluación

EVALUACIÓN (INSTRUMENTOS, CRITERIOS, PORCENTAJES, ETC.)		
	Ponderación mínima	Ponderación máxima
Pruebas, ejercicios y problemas, resueltos en clase o individualmente a lo largo del curso	0	10
Valoración final de trabajos (individual o en grupo)	40	50
Prueba escrita	20	50
Presentación oral de trabajos	10	20
Aportaciones del alumno en sesiones de discusión y actitud del alumno en las diferentes actividades desarrolladas	0	10
INFORMACIÓN ADICIONAL		

* **posibilidad** de entregar por grupo

INTRODUCCIÓN A LA CAPA LÍMITE (Biblio: Stull Capítulo 1-2)

- Capas y Escalas : definiciones
- La Capa Límite
 - Objetivos, Importancia y Alcance
 - Hipótesis que aplicamos en esta asignatura
 - El no efecto invernadero en la capa límite
 - La Tierra no gira (a poca duración)
- Esquema de la Asignatura
- Observaciones de características promedios
 - Perfiles de viento (Ekman)
 - Perfiles de temperatura y humedad

INTRODUCCIÓN A LA CAPA LÍMITE

- Capas y Escalas : definiciones
- La Capa Límite
 - Objetivos, Importancia y Alcance (Smith Ch1)
 - Hipótesis que aplicamos en esta asignatura
 - El no efecto invernadero en la capa límite
 - La Tierra no gira (a poca duración)
- Esquema de la Asignatura
- Observaciones de características promedios
 - Perfiles de viento (Ekman)
 - Perfiles de temperatura y humedad

Capas Bajas de la Atmósfera

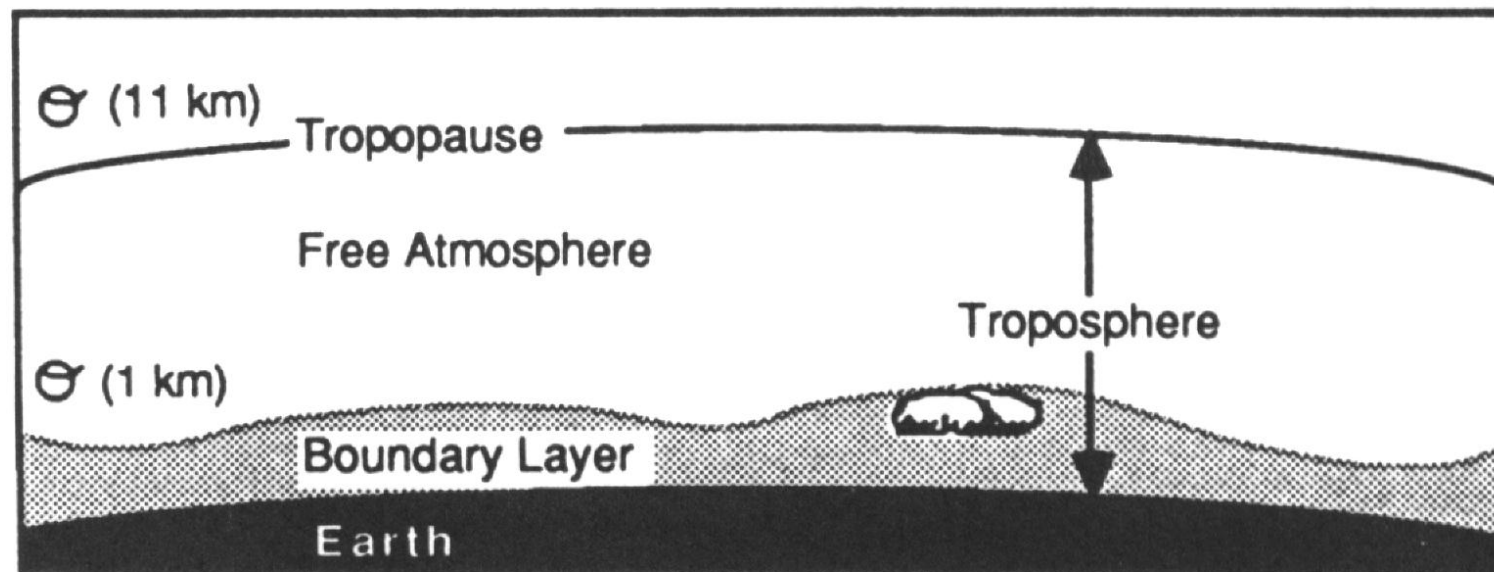


Fig. 1.1 The troposphere can be divided into two parts: a boundary layer (shaded) near the surface and the free atmosphere above it.

Definición

- La capa límite es la parte de la troposfera que se nota **directamente** vinculada a la superficie
 - **Escala de tiempo de una hora o menos**
 - Para que reaccione
 - No necesariamente equilibrarse
 - Se notan los cambios diurnos en superficie

Capa Límite = Boundary Layer (BL)

Definitions:

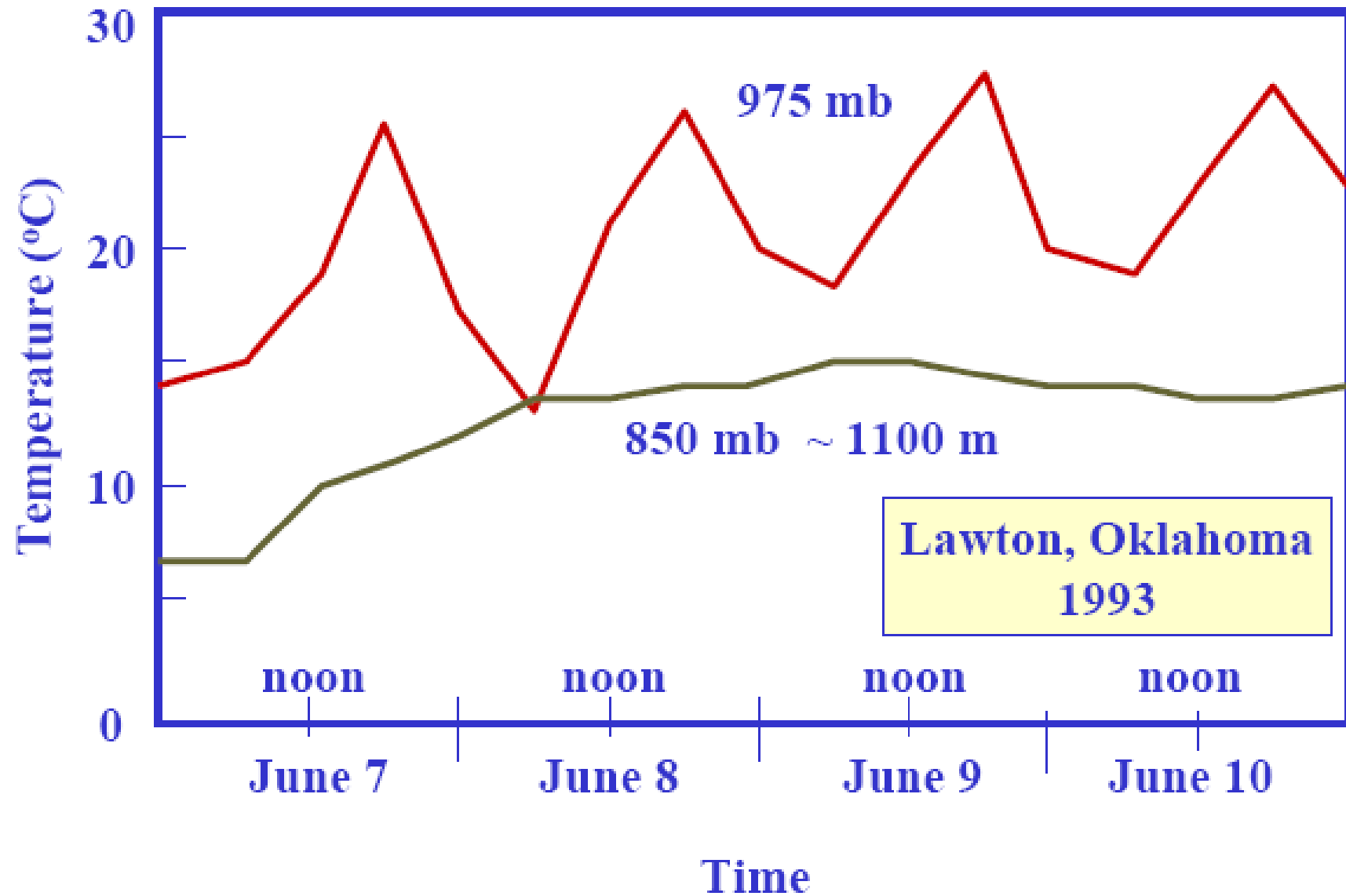
Stull: "that part of the troposphere that is directly influenced by the presence of the earth's surface, and responds to surface forcings with a timescale of about an **hour or less**"

Capa Límite = Boundary Layer (BL)

Definitions:

Garratt: "the layer of air directly above the Earth's surface in which the effects of the surface (friction, heating and cooling [and moistening]) are felt directly on time scales of **less than a day**, and in which significant fluxes of momentum, heat or matter are carried by turbulent motions on a scale of the order of the depth of the boundary layer or less."

Temperature variations in the lower atmosphere



Tipos de Capa Límite

- Estable
 - Superficie fría
 - Frecuente por la noche
 - Encima de hielo, nieve, agua fría
 - "Stable Boundary Layer" (SBL)
- Casi-neutral
- Convectivo
 - Calor en superficie
 - Frecuente de día
 - Encima de agua caliente
 - "Convective Boundary Layer" (CBL)

Tipos de capa límite

Marítima	Continental
Poca variabilidad diurna	Mucha variabilidad diurna
1-2 km (max de 3, quizás)	Hasta 5 km encima de desierto
Razón de Bowen baja	Razón de Bowen alta
Importancia del estado de las olas	Importancia de la morfología (invariable) de la superficie

Escalas Atmosféricas

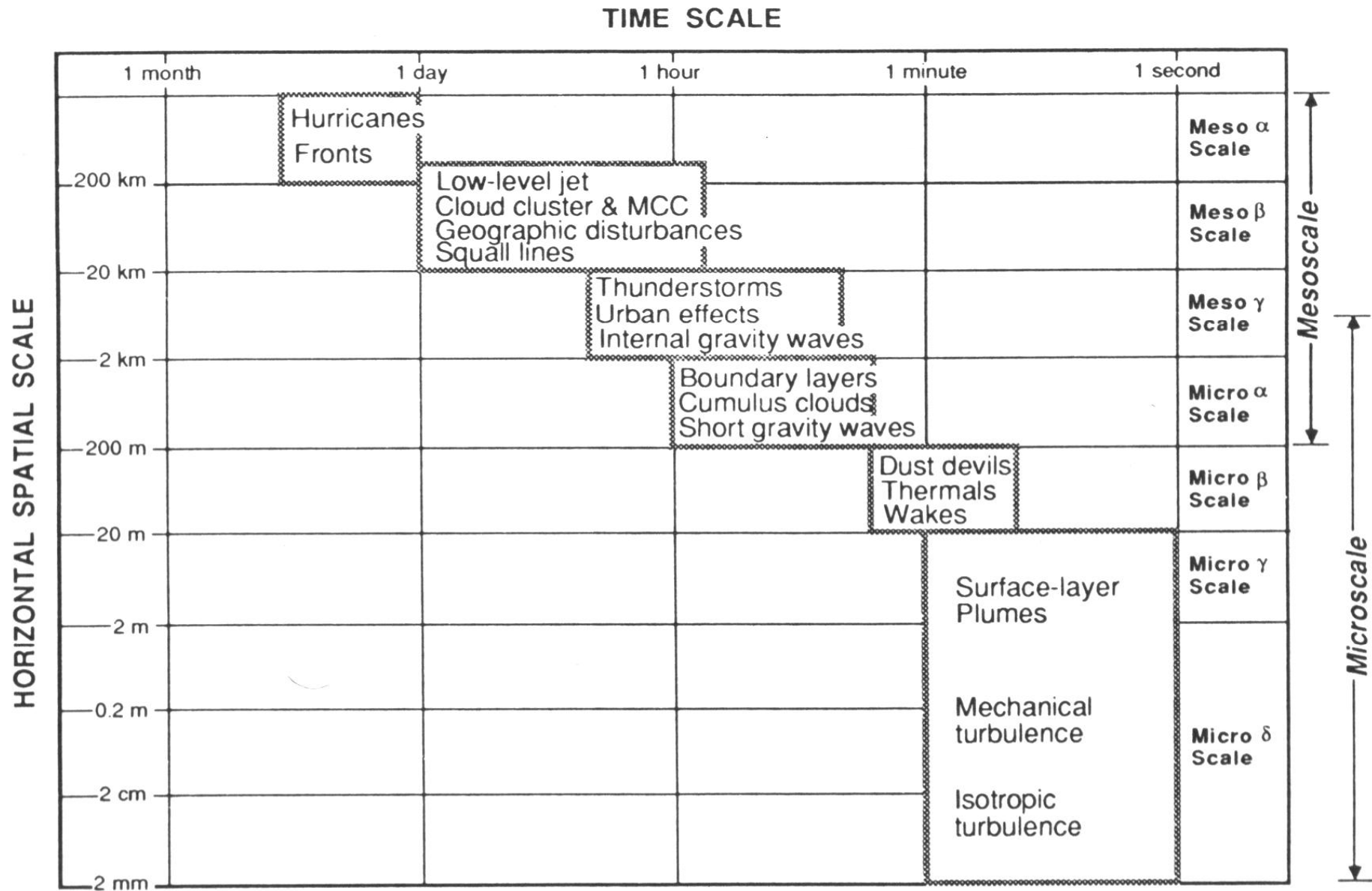
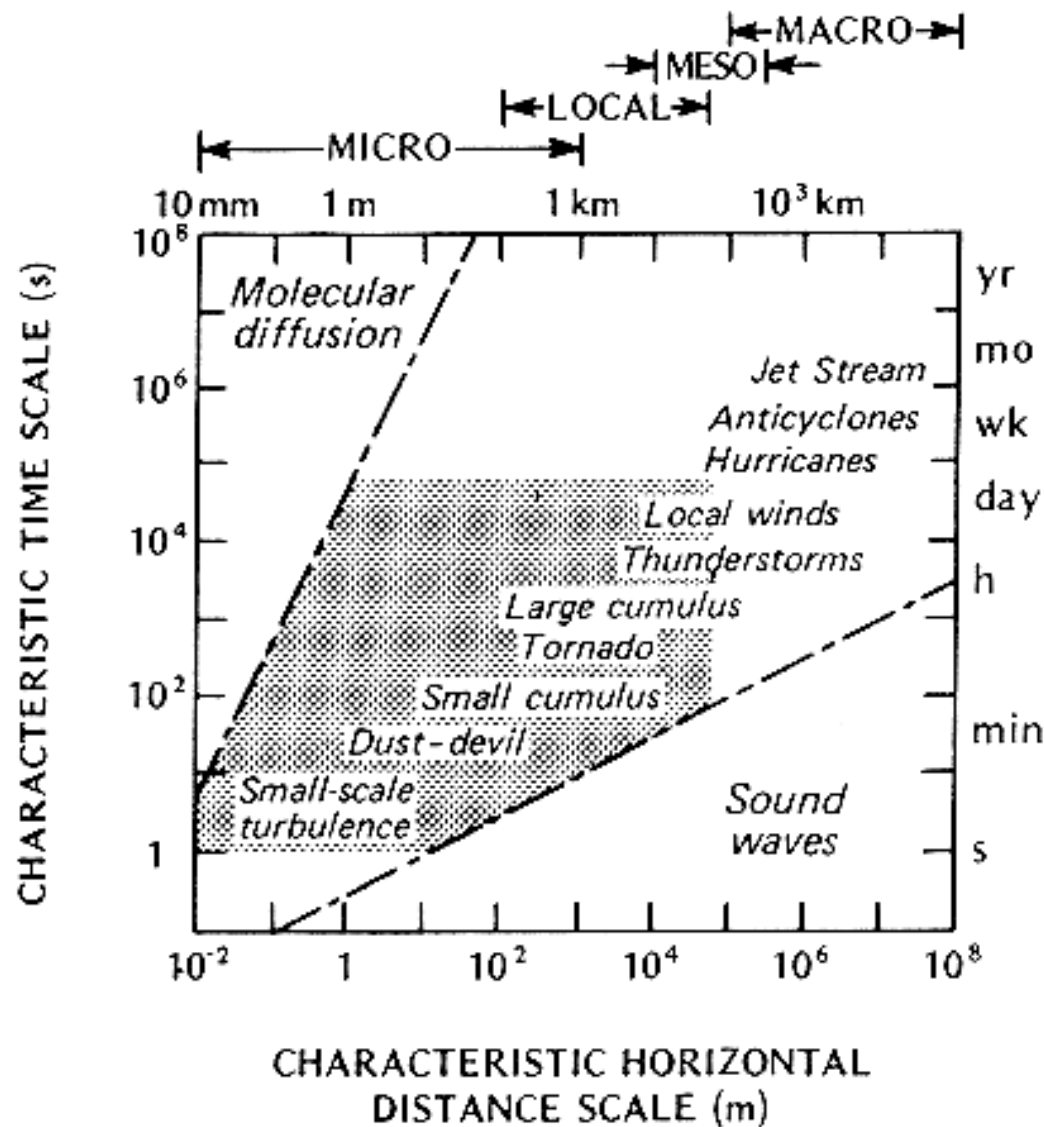
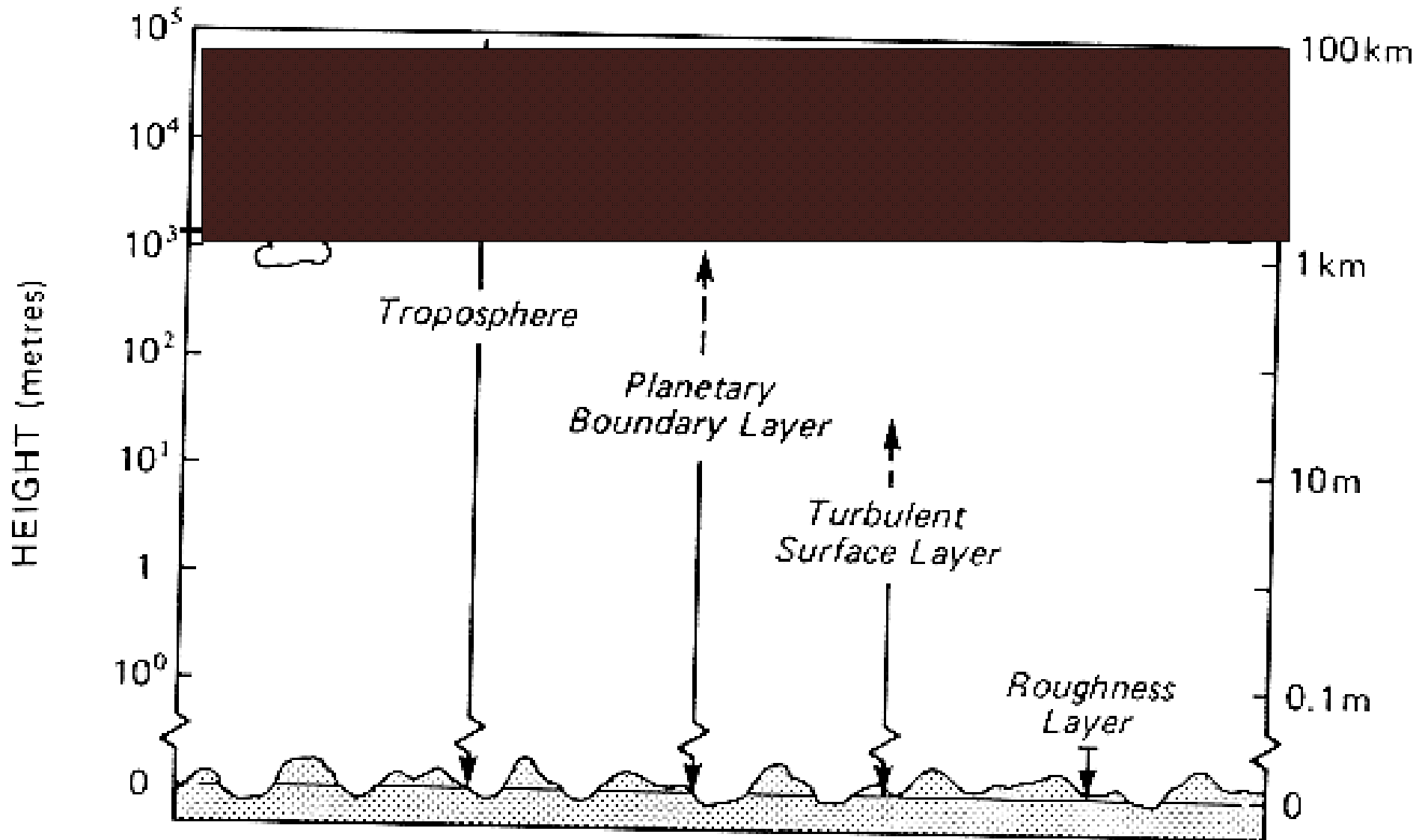


Fig. 1.15 Typical time and space orders-of-magnitude for micro and mesoscales. (After Orlandi, 1975.)

Escalas Atmosféricas



Capas Dentro de Capas



Capas atmosféricas

Capa	“Techo” <i>aproximativo</i>	Características
Troposfera (<i>troposphere</i>)	10km; varía con la latitud.	El tiempo; la mayor parte de las nubes; inversión permanente en el techo
Capa limite (<i>boundary layer</i>)	1km; cambia mucho con la insolación (día/noche).	Influencia directa de la superficie (en una hora o menos); inversión frecuente en el techo.
Capa superficial (<i>surface layer</i>)	100 m; difícil a definir; pero es aquí que queremos medir los flujos.	Gradientes fuertes. Flujos turbulentos varían menos que 10% de su magnitud.
Capa de Rugosidad (<i>roughness sublayer</i>)	10 m encima de la vegetación; depende mucho de la rugosidad de la vegetación y del terreno.	Flujos turbulentos vinculados directamente a los elementos individuales de rugosidad.

La Capa Límite

- Turbulenta, de manera casi continua
- Procesos importantes
 - Emisión de contaminantes
 - Arrastre de fricción
 - Evaporación y transpiración
 - Transferencia de Calor
 - Modificación del viento por el terreno
 - Algunos tipos de nubes

Fair weather cumulus



Stratocumulus

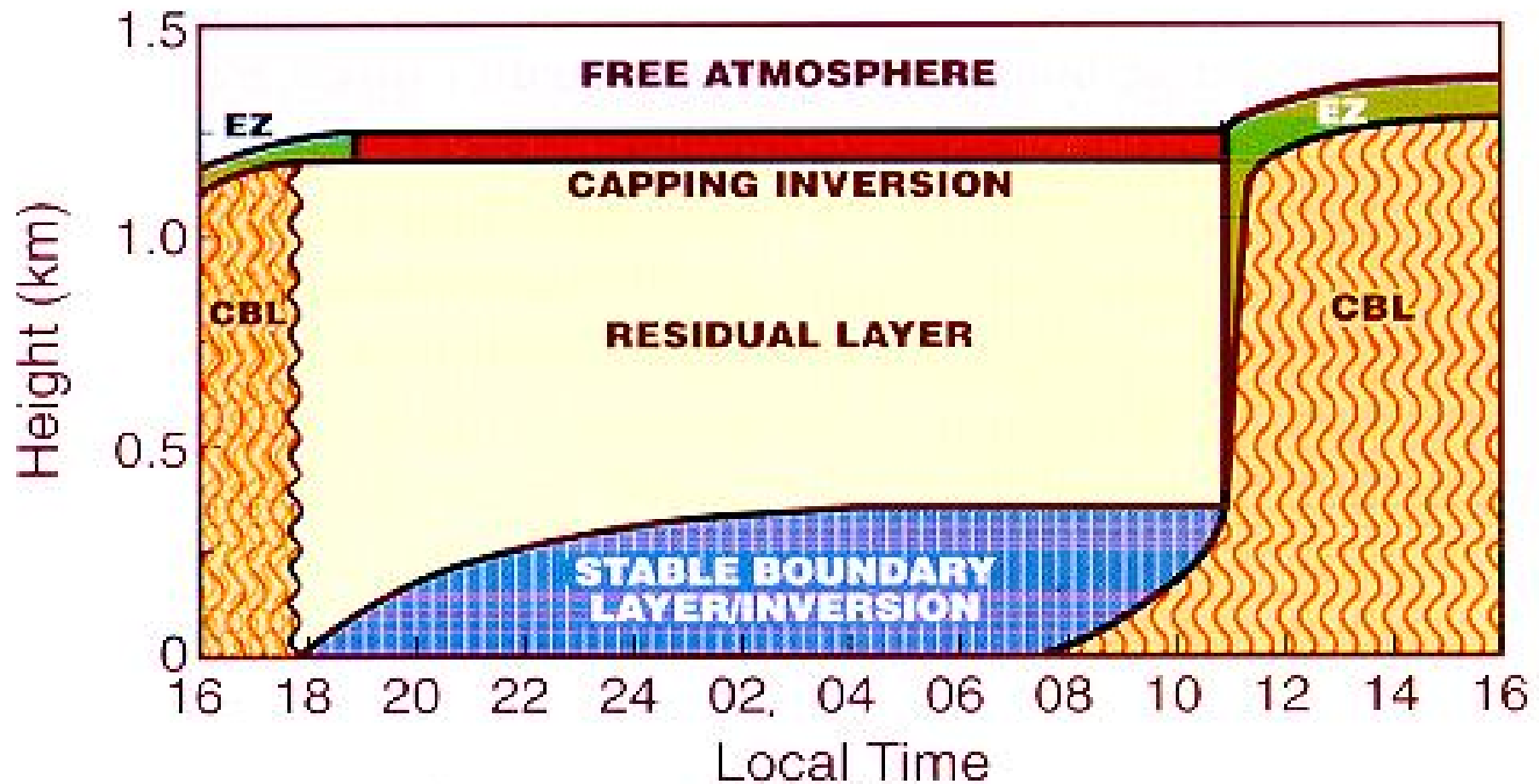




La Capa Límite

- Turbulenta, de manera casi continua
- Procesos importantes
 - Emisión de contaminantes
 - Arrastre de fricción
 - Evaporación y transpiración
 - Transferencia de Calor
 - Modificación del viento por el terreno
 - Algunos tipos de nubes
- Características
 - Comportamiento diurno típico
 - Regiones y sub-capas

Evolución diurna de la capa límite



La Capa Límite

- El comportamiento diurno típico no es debido a la influencia directa de la radiación
 - Absorbe poca radiación solar
 - La superficie tiene $\epsilon \sim 90\%$
- Sino a los intercambios con la superficie
 - Indirectamente por la radiación
 - Afecta a muchas variables (T , RH , u , CO_2 , ...)

Escalas Atmosféricas

Espectro energético

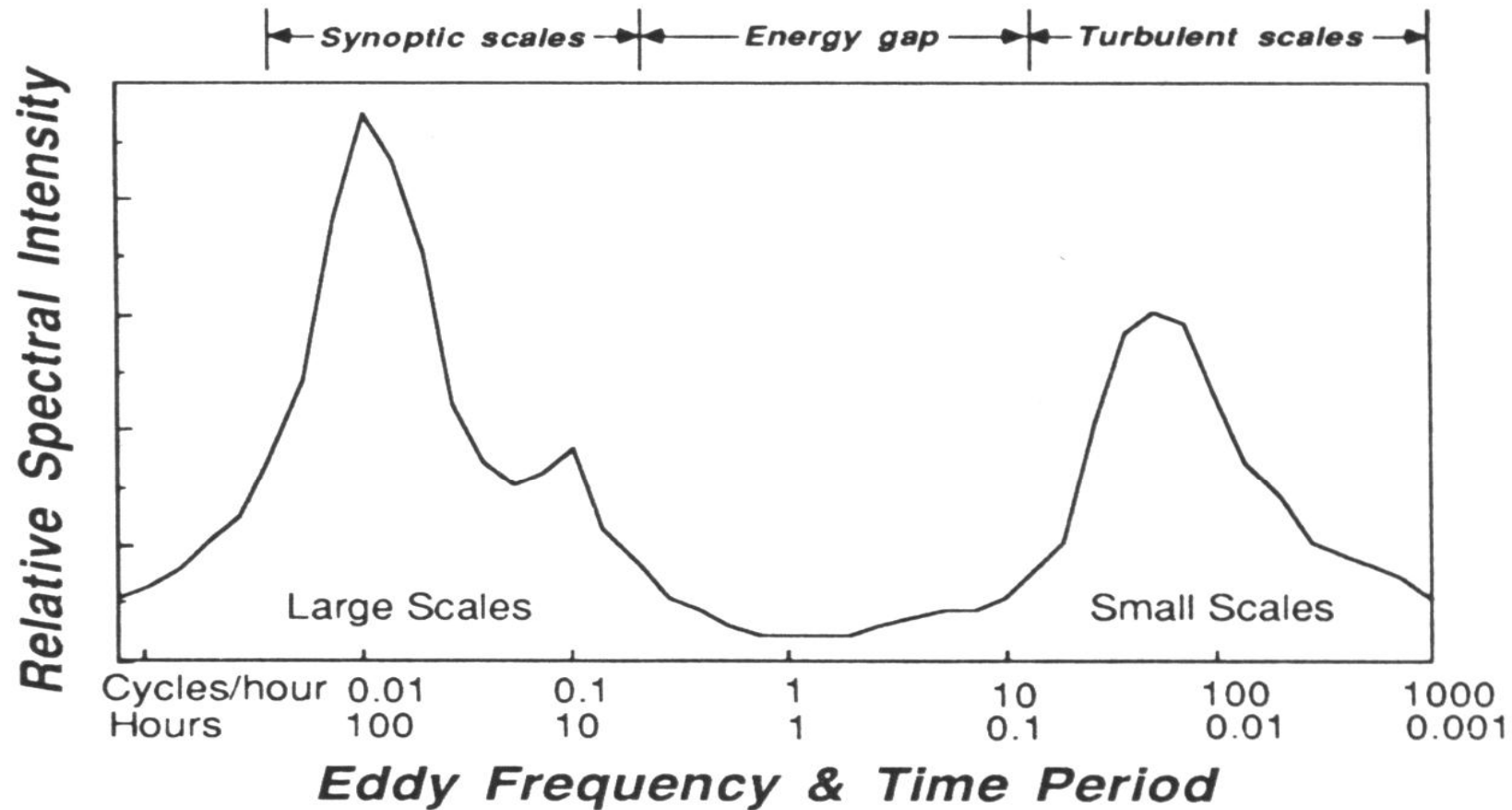


Fig. 2.2 Schematic spectrum of wind speed near the ground estimated from a study of Van der Hoven (1957).

INTRODUCCIÓN A LA CAPA LÍMITE

- Capas y Escalas : definiciones
- La Capa Límite
 - Objetivos, Importancia y Alcance
 - Hipótesis que aplicamos en esta asignatura
 - El no efecto invernadero en la capa límite
 - La Tierra no gira (a poca duración)
- Observaciones de características promedios
 - Perfiles de viento (Ekman)
 - Perfiles de temperatura y humedad
- Esquema de la Asignatura

Cómo abordar el tema


- La turbulencia no se puede estudiar / investigar de manera determinística
- Así, los micrometeorólogos han definido tres vías de exploración
 - Los métodos estocásticos
 - La teoría de la semejanza
 - La clasificación fenomenológica

Cómo abordar el tema

- **Los métodos estocásticos** estudian las estadísticas (promedios, varianzas, y covarianzas entre variables relevantes) de la turbulencia
- **La teoría de la semejanza** describe un comportamiento aparentemente común que presentan muchos fenómenos observados empíricamente
- En **los métodos fenomenológicos**, las estructuras más grandes (como son los termales) se clasifican y a veces se pueden describir de manera determinística

Importancia

- Turbulenta, de manera casi continua
- Procesos importantes
 - Emisión de contaminantes*
 - Arrastre de fricción
 - Evaporación y transpiración
 - Transferencia de Calor
 - Modificación del viento por el terreno
 - Algunos tipos de nubes



Lugar apropiada
para caracterizar
intercambios con
la superficie

*ejm. NH_3

Importancia - Relevancia en otros campos de conocimiento (I +D)

- Contaminación Atmosférica
- La Hidrología
- La Ecofisiología
- La Meteorología
 - Urbana
 - Agricultura
 - Meso-escálica
 - Predicción de tiempo y clima
 - Aeronáutica

Contaminación Atmosférica

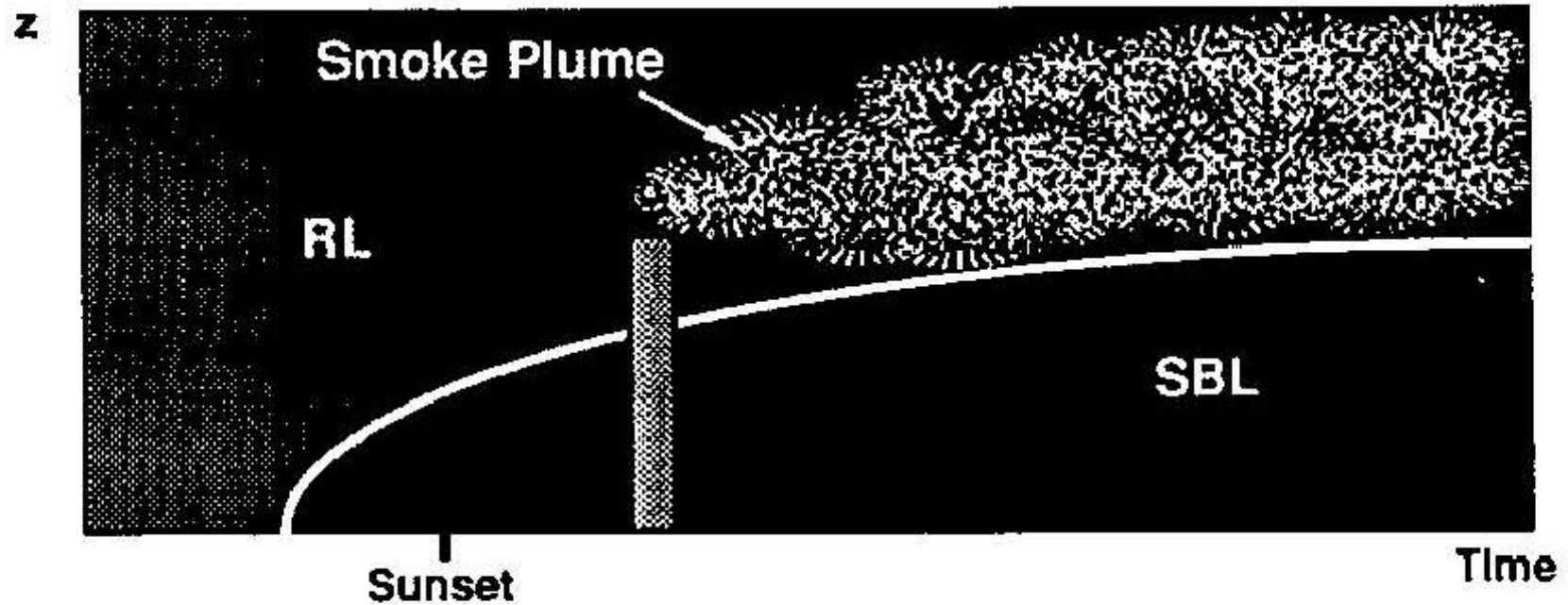
- Transporte y dispersión de los contaminantes, ejm. desde chimeneas industriales
- Procesos
 - Mezcla turbulenta
 - Fotoquímica
 - Deposición (seca)
- Importancia de la inversión



Los Angeles Smog

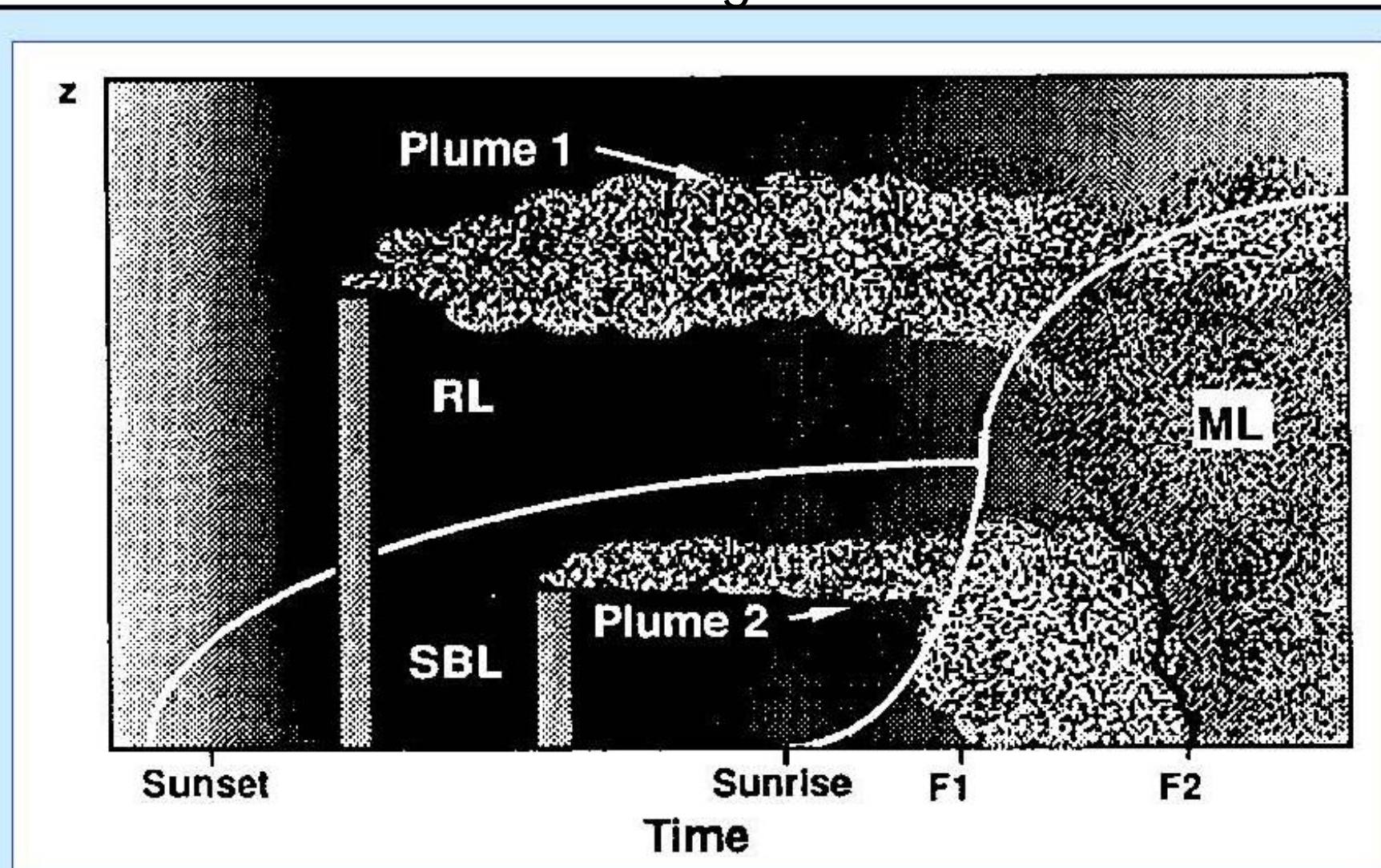


Mount Isa Mines, Central Queensland, Australia



Lofting of a smoke plume occurs when the top of the plume grows upward into a neutral layer of air while the bottom is stopped by a stable layer.

Fumigación



Sketch of the fumigation process, where a growing mixed layer mixes elevated smoke plumes down to the ground. Smoke **plume 1** is fumigated at time **F1**, while plume 2 is fumigated at time **F2**.

Cónico

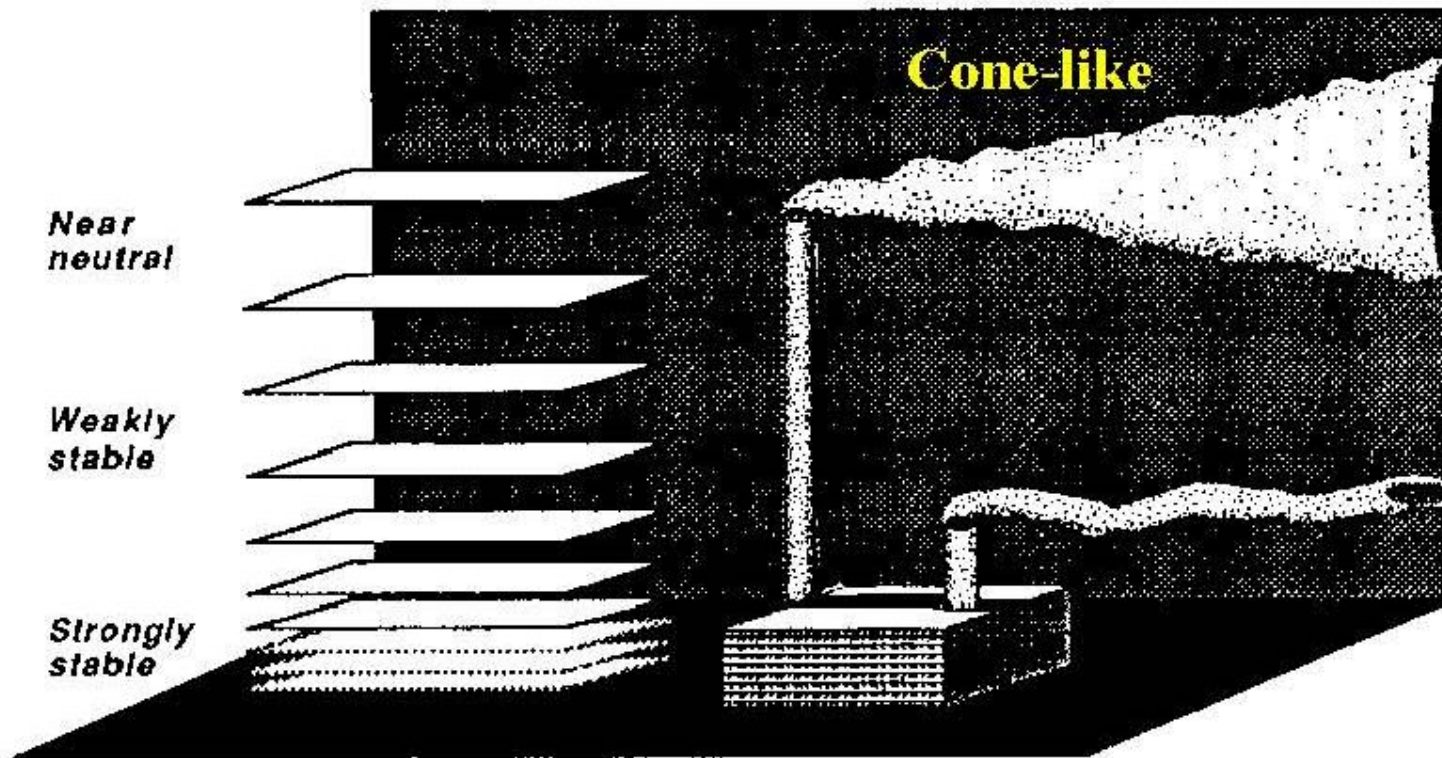
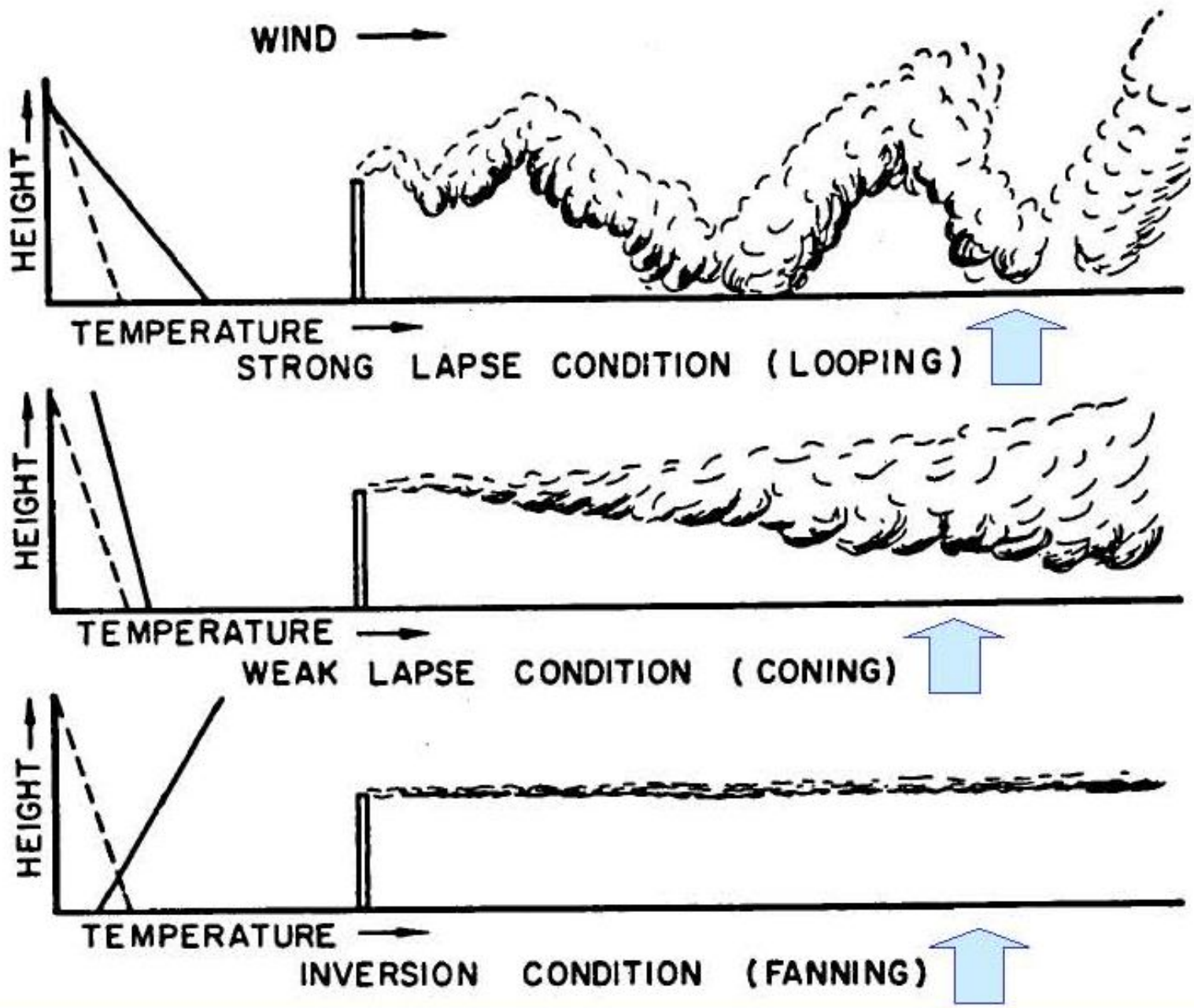
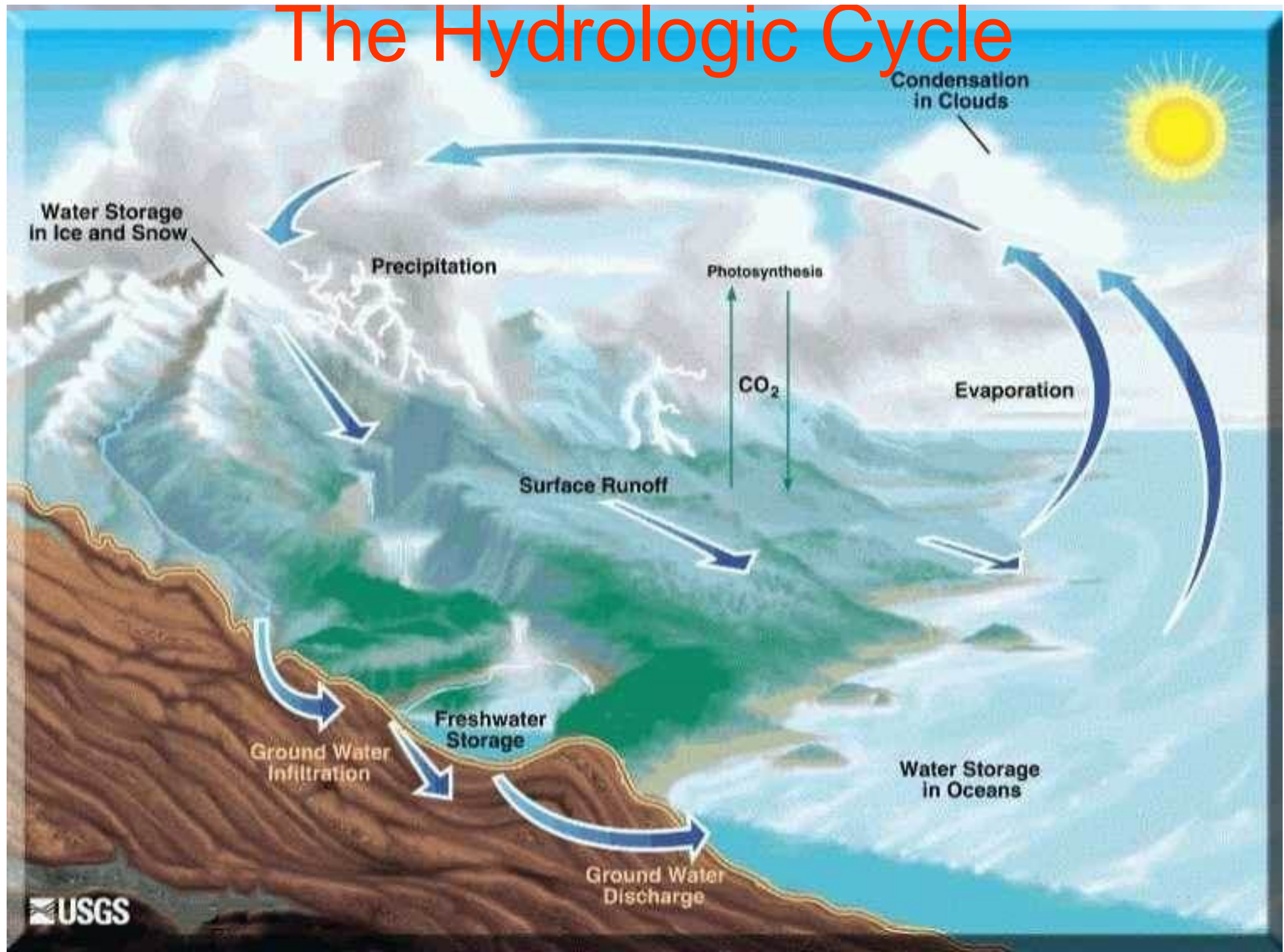


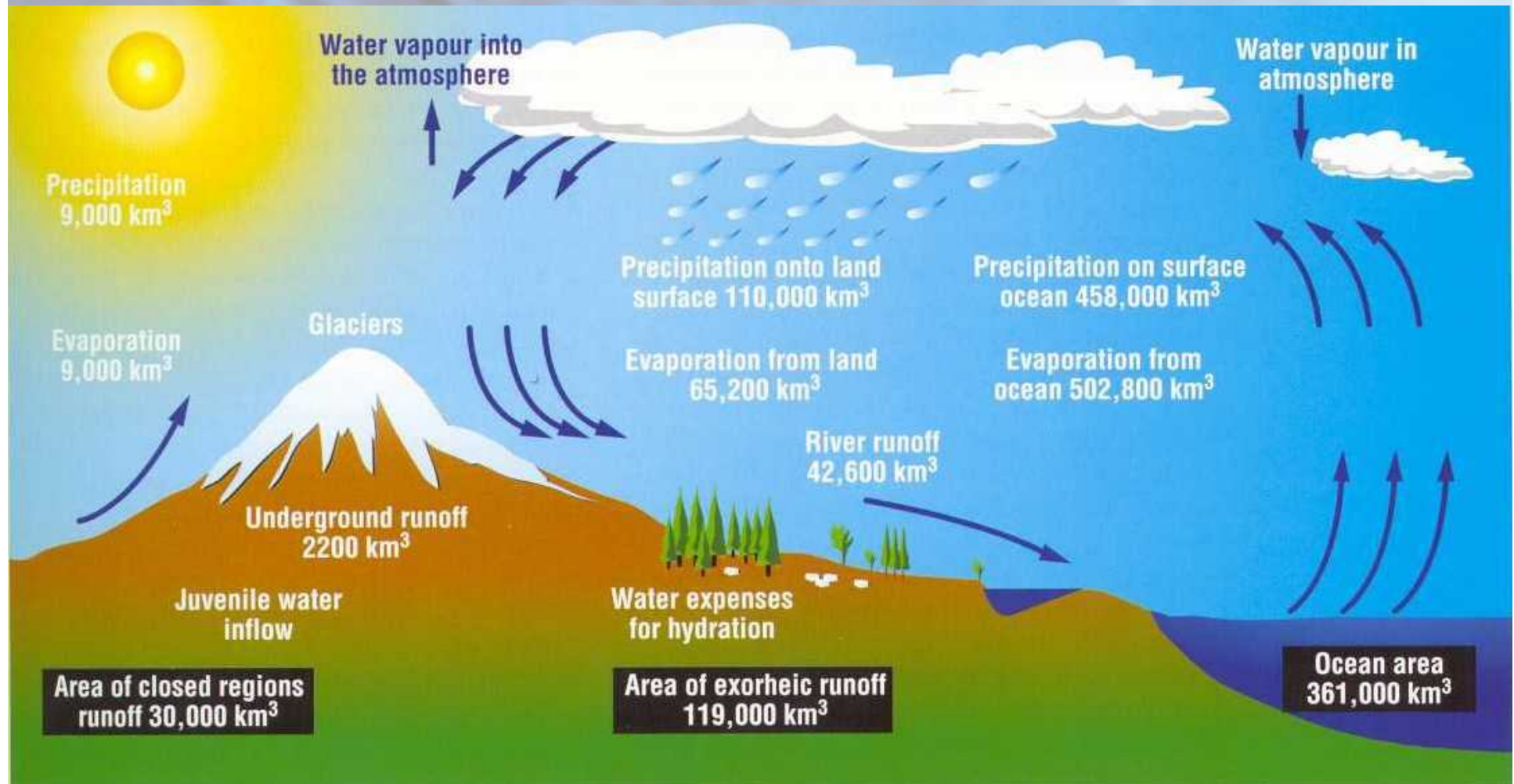
Fig. 1.10 The static stability decreases with height in the nocturnal boundary layer, gradually blending into the neutrally-stratified residual layer aloft, as indicated by the isentropic surfaces sketched on the left. Smoke emissions into the stable air fan out in the horizontal with little vertical dispersion other than wavelike oscillations. Smoke emissions in the neutral residual-layer air spread with an almost equal rate in the vertical and horizontal, allowing the smoke plume to assume a cone-like shape.



The Hydrologic Cycle



The Hydrological Cycle (quantitative)



Source: <http://www.unesco.org/science/waterday2000/Cycle.htm>

Evapotranspiración

Evaporación total de agua, suelo, nieve, hielo y otras superficies, más la transpiración de las plantas

Evaporación: vaporización al aire desde superficie terrestre

Transpiración: las plantas quitan el agua del suelo

Evapotranspiración (ET) – su tasa depende de:

- La humedad del aire
- La temperatura (capacidad del aire, presión saturante de vapor de agua)
- El intercambio de energía entre suelo, planta, y aire
- Aspectos aerodinámicos (velocidad del viento, rugosidad aerodinámica de la superficie)

Meteorología (a escalas superiores)

- Condiciones de entorno para la modelización a escalas más grande
- Intercambios a través la capa límite
 - Calor – el motor que actúa los movimientos atmosféricos
 - Inercia - El “freno” atmosférico

La Meteorología Aeronáutica

- Los momentos más peligrosos del vuelo
 - Despegue
 - Aterrizaje
- Fenómenos de la capa límite
 - Niebla y nubes bajas
 - Chorros bajos de aire (low-level jet) nocturnos
 - Cizalla fuerte y turbulencia de alta intensidad
- Modelización de su
 - Desarrollo
 - Mantenimiento
 - Disipación

INTRODUCCIÓN A LA CAPA LÍMITE

- Capas y Escalas : definiciones
- La Capa Límite
 - Objetivos, Importancia y Alcance
 - Hipótesis que aplicamos en esta asignatura
 - El no efecto invernadero en la capa límite
 - La Tierra no gira (a poca duración)
- Observaciones de características promedios
 - Perfiles de viento (Ekman)
 - Perfiles de temperatura y humedad
- Esquema de la Asignatura

La “Turbulencia Congelada”

- Problema
 - Necesidad de información sobre los remolinos (tamaño, frecuencia)
 - Imposibilidad de sacar una foto de la estructura de la capa límite, o hacer medidas espacialmente representativas
 - Más fácil: medir durante mucho tiempo en un punto fijo, y suponer que el viento te trae una muestra de remolinos
- Hipótesis (Taylor, 1938): la evolución de la turbulencia es lenta comparado con su advección tras un punto de medición

La Hipótesis de Taylor

- Para una variable ξ , la hipótesis de Taylor dice que la turbulencia está congelada si:

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{\partial\xi}{\partial t} + U \frac{\partial\xi}{\partial x} + V \frac{\partial\xi}{\partial y} + W \frac{\partial\xi}{\partial z} = 0$$

- O sea:

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} = -U \frac{\partial\xi}{\partial x} - V \frac{\partial\xi}{\partial y} - W \frac{\partial\xi}{\partial z}$$

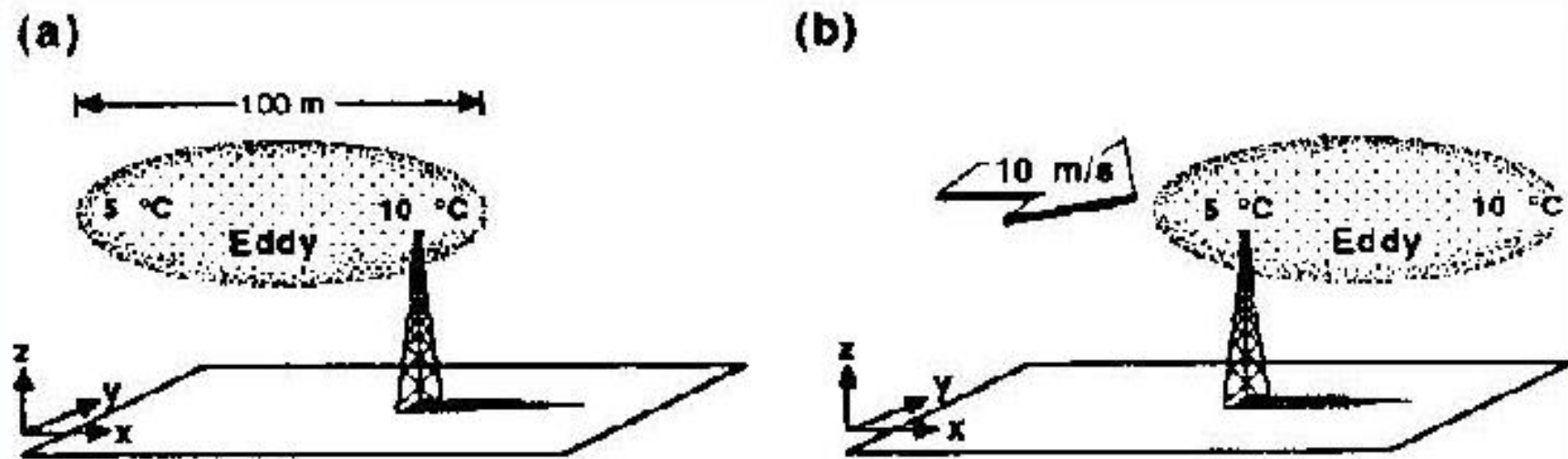


Fig. 1.4 Illustration of Taylor's hypothesis. (a) An eddy that is 100 m in diameter has a 5 °C temperature difference across it. (b) The same eddy 10 seconds later is blown downwind at a wind speed of 10 m/s.

Temperature measured varies with time as the eddy advects past.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0.05 \text{ K/m} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = -0.5 \text{ K/s} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = -U \frac{\partial T}{\partial x}}$$

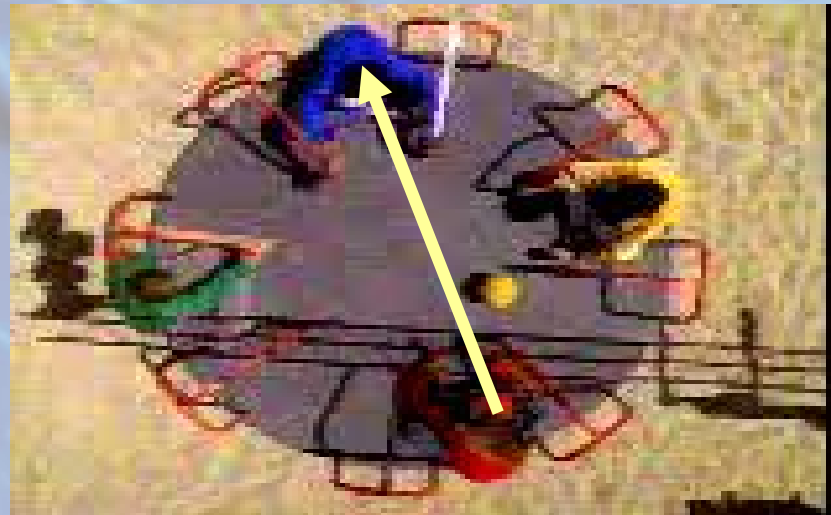
Taylor's hypothesis for one dimension

La Tierra no Gira

- Problema: Las ecuaciones de movimiento son demasiado complicadas
- Hipótesis: Los remolinos no se dan cuenta de la rotación terrestre

¿Cuándo es importante la fuerza de Coriolis?

- Esta rueda giratoria (columpio) gira a $2\pi (5s)^{-1}$



- Flecha amarilla = velocidad (dos opciones de magnitud)
 - Una mariposa pasa en 2.5s hacía el noroeste
 - El chico de rojo tira una bala al de azul
- ¿Qué diferencia hay? (análisis de escala)

¿Cuándo es importante el efecto Coriolis (en la capa límite)?

- El efecto Coriolis determina la dirección del viento geostrófico
- No es importante para la descripción de la turbulencia
 - Se acaba el movimiento antes de darse cuenta de la rotación de la Tierra

Leyendas Urbanas



Hipótesis: El calor se transfiere únicamente por la turbulencia

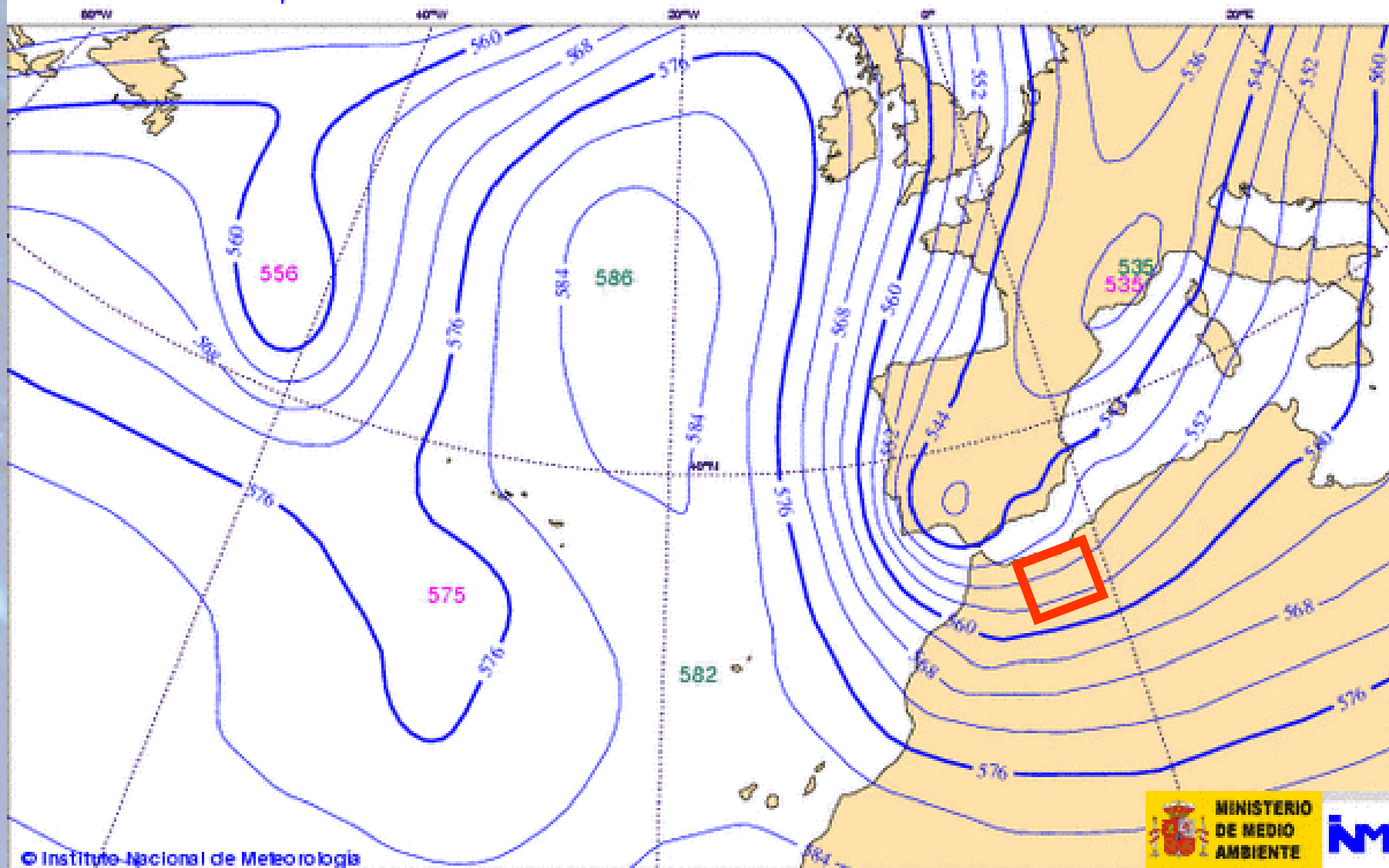
- Problema: La ecuación termodinámica es demasiado complicada
- Hipótesis: No hay divergencia de los flujos radiativos en la capa límite
 - Ni absorción solar
 - Ni efecto invernadero
 - Aunque hay gradientes de temperatura/humedad
 - La capa es demasiado fina para influir

INTRODUCCIÓN A LA CAPA LÍMITE

- Capas y Escalas : definiciones
- La Capa Límite
 - Objetivos, Importancia y Alcance
 - Hipótesis que aplicamos en esta asignatura
 - El no efecto invernadero en la capa límite
 - La Tierra no gira (a poca duración)
- Observaciones de características promedios
 - Perfiles de viento (Ekman)
 - Perfiles de temperatura y humedad
- Esquema de la Asignatura

ISOHIPSAS SUPERFICIE DE 500hPa

Viernes 9 Noviembre 2001 12UTC Predicción H+ 6 VAL: Viernes 9 Noviembre 2001 18UTC
500 hPa Altura Geopotencial





LOW

p-3

p-2

SFC

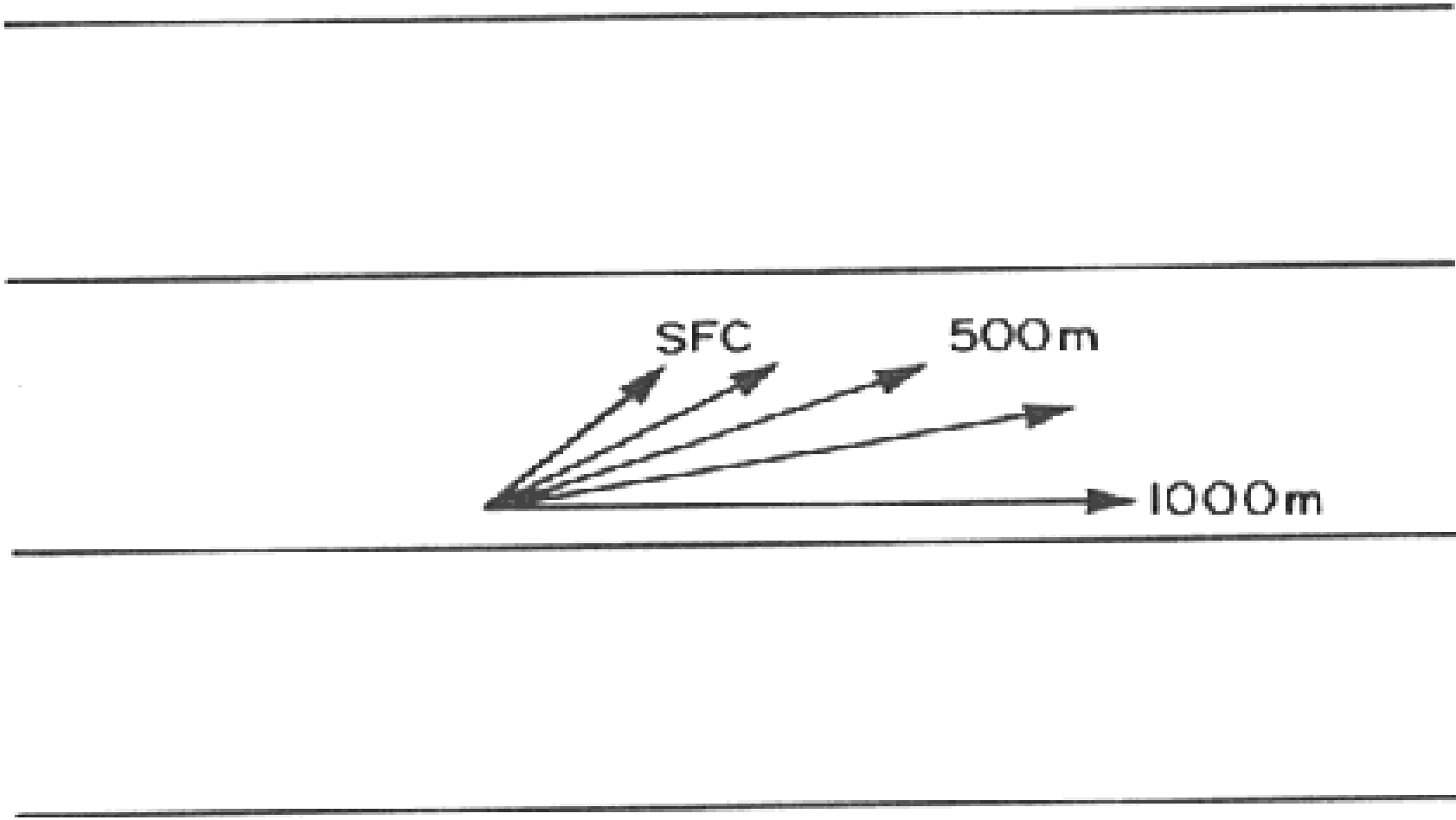
500m

1000m

p-1

HIGH

p





(Gravity well.avi video)

Perfiles durante el día

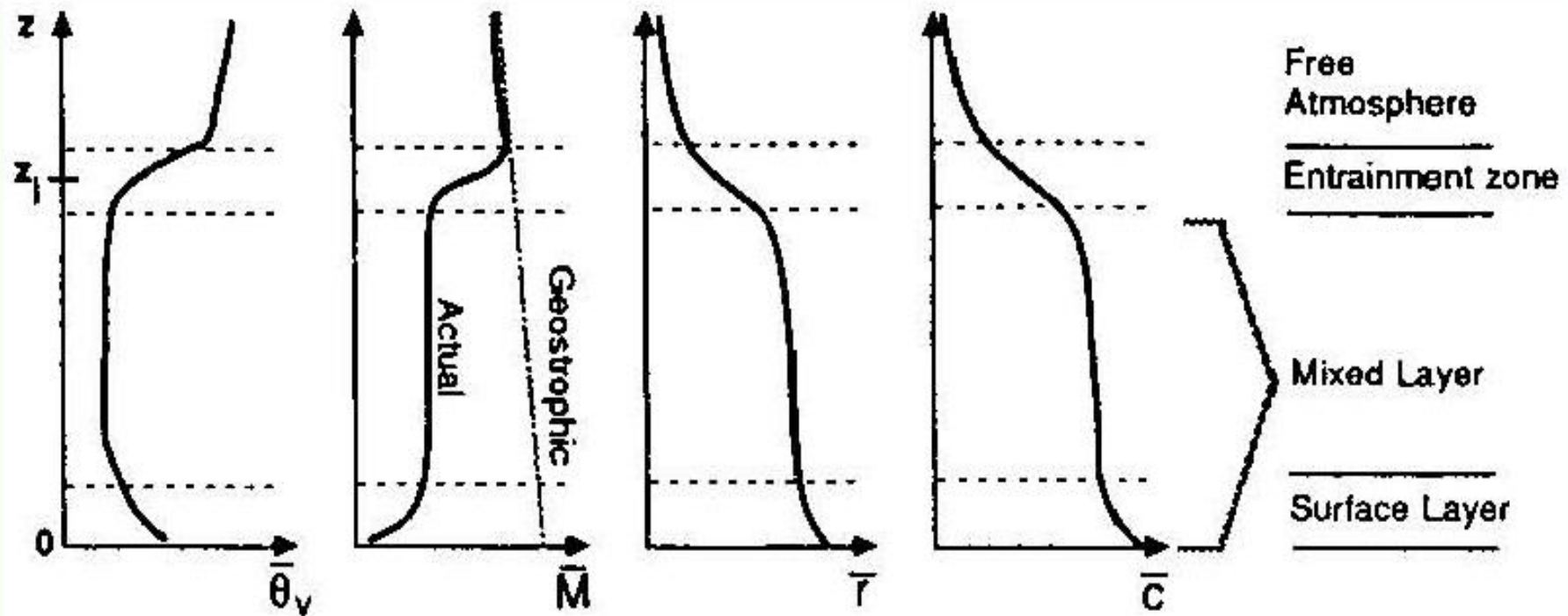
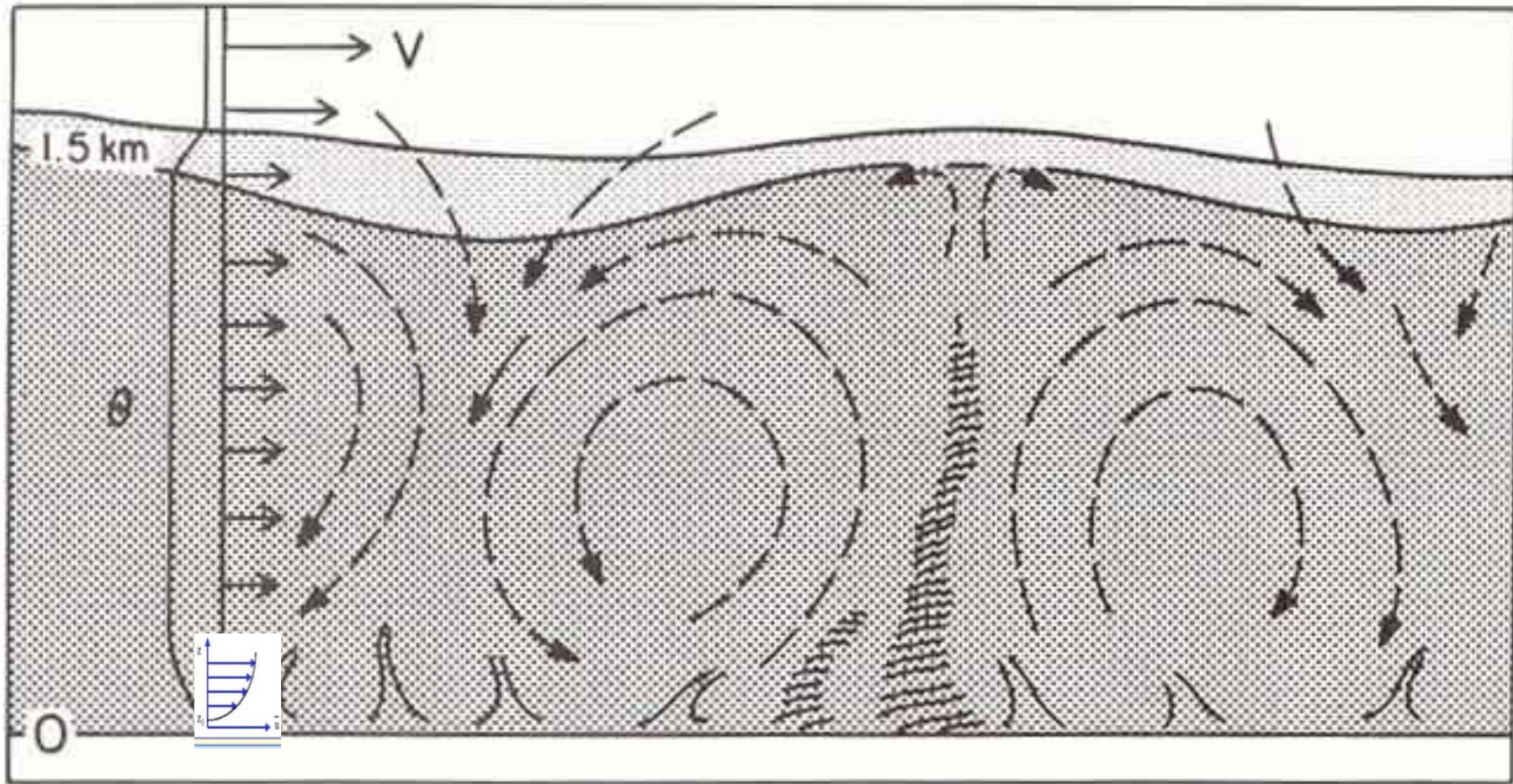


Fig. 1.9

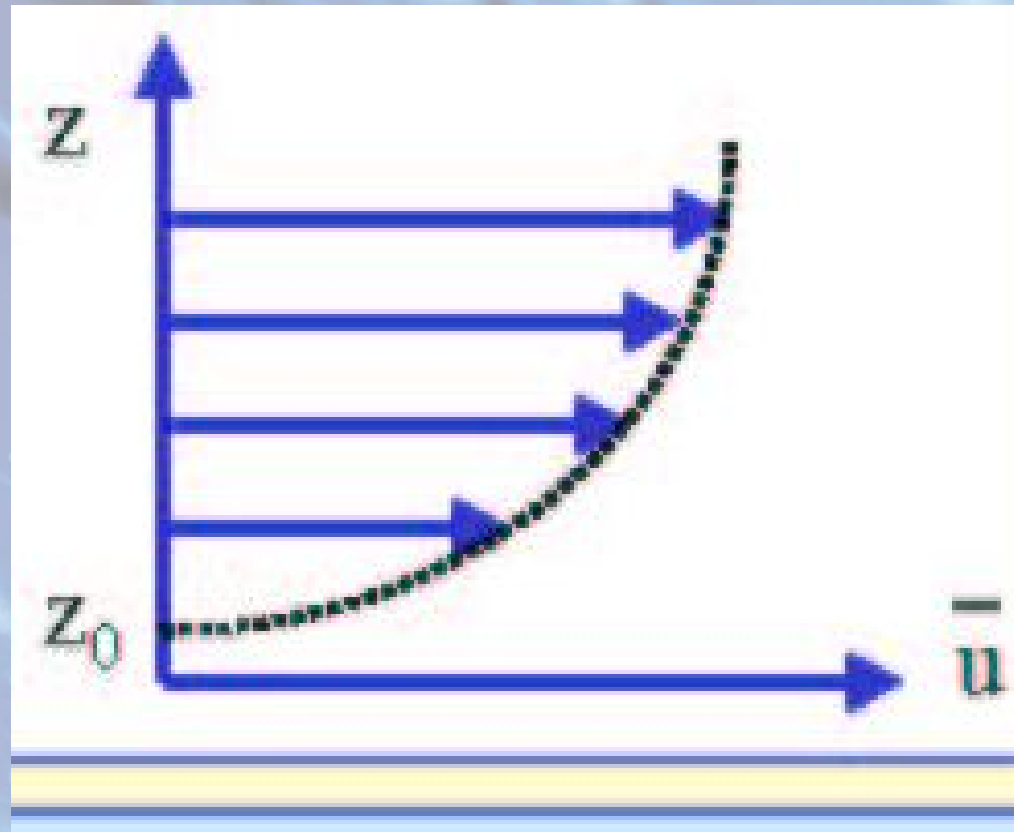
Typical daytime profiles of mean virtual potential temperature $\bar{\theta}_v$, wind speed M (where $M^2 = \bar{u}^2 + \bar{v}^2$), water vapor mixing ratio \bar{r} , and pollutant concentration \bar{c} .

Variación espacial (día)



Perfil logarítmico

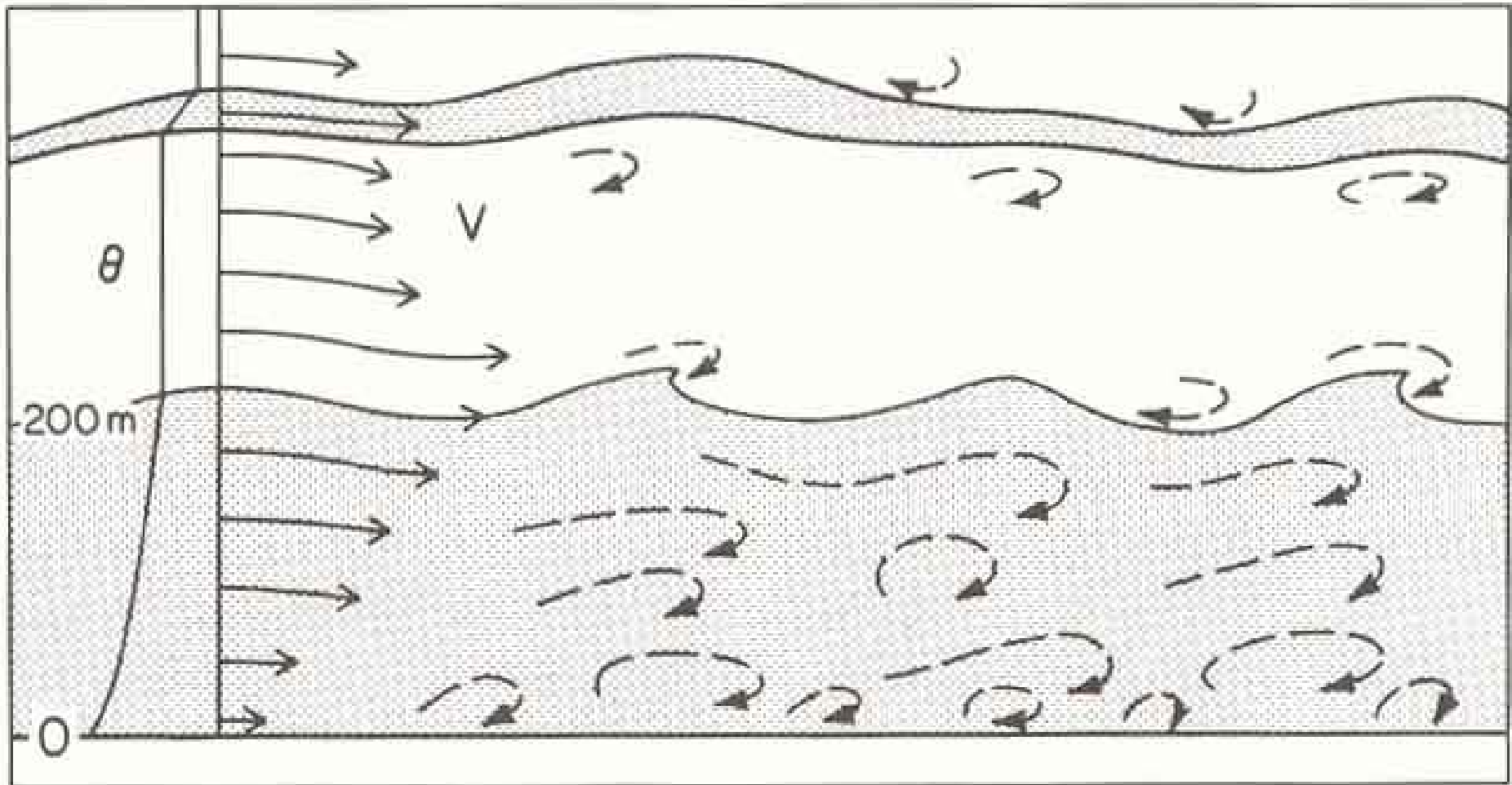
$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$



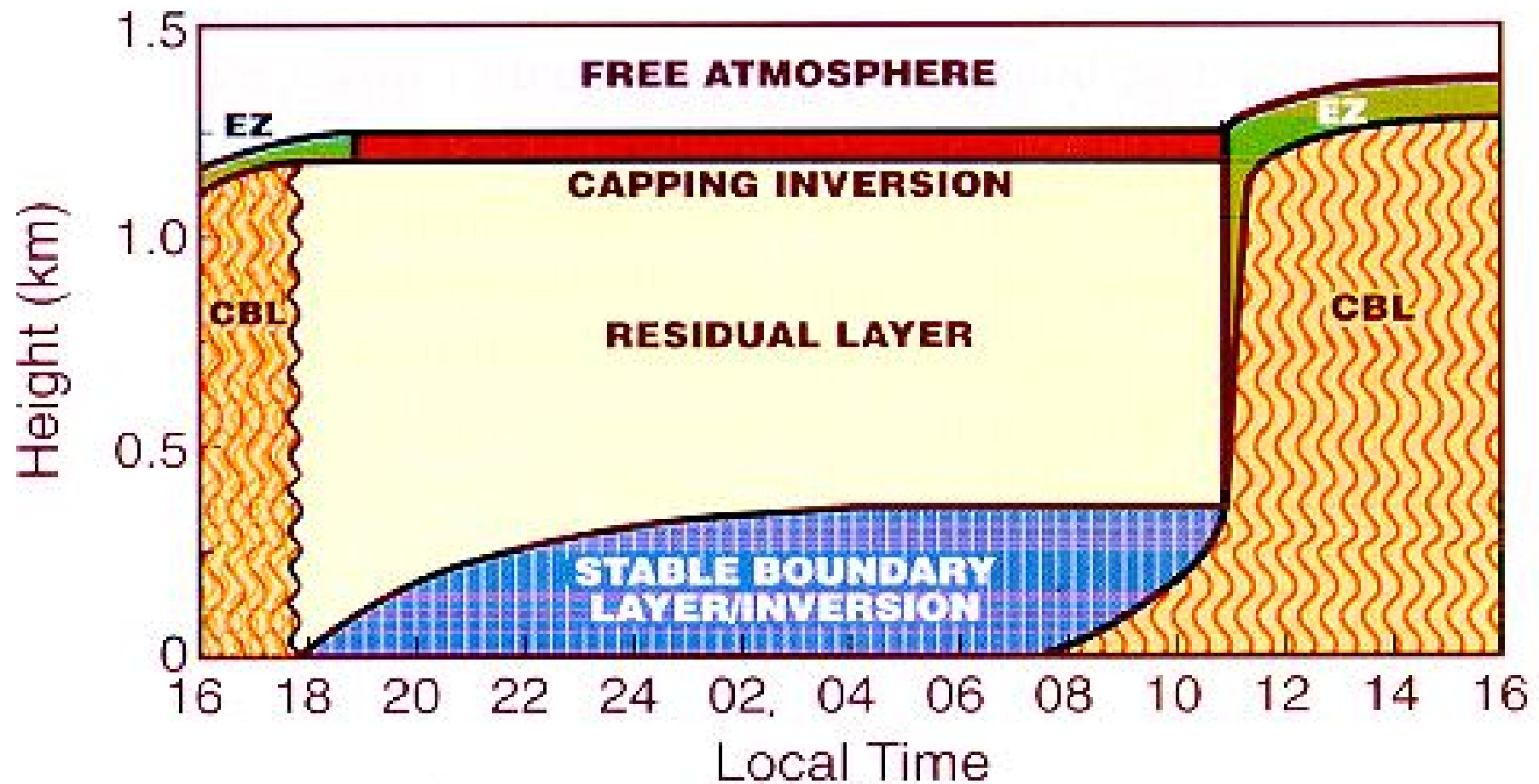
La capa límite estable (SBL)

- Enfriamiento de la superficie por la noche
 - Estabilidad, crece desde abajo
 - Intermitencia de la turbulencia
 - Olas de gravedad
 - Difícil a caracterizar
 - Corta la conexión con la capa límite encima
 - La capa residual (neutro)
 - Acumulación de “contaminantes” cerca de la superficie

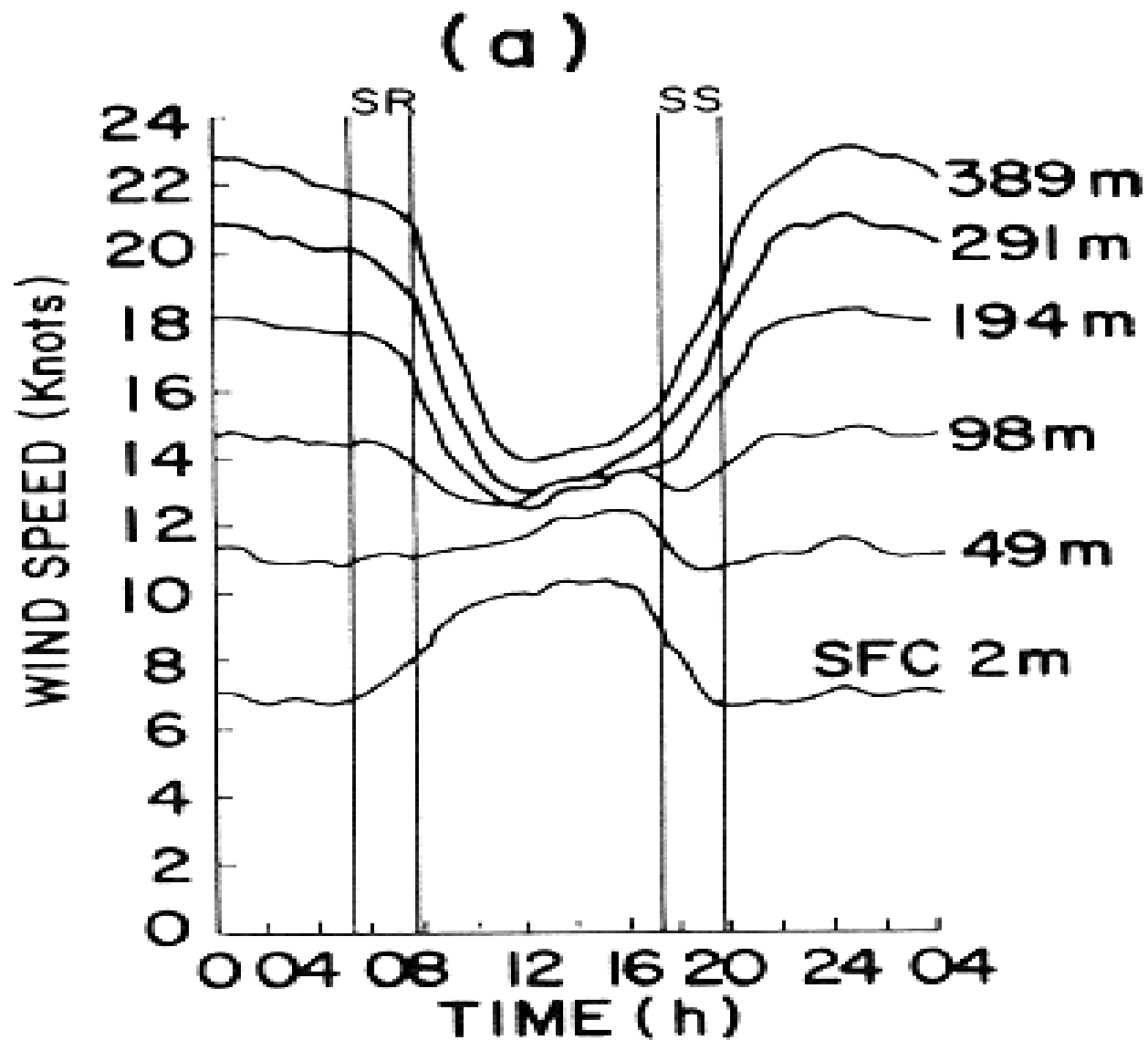
La capa límite estable



Evolución diurna de la capa límite



“Low-level jets” (chorros)



Esquema de la Asignatura

- Microclimatología - intercambios y flujos energéticos (radiación, calor sensible y latente)
- Micrometeorología - intercambios y flujos turbulentos (calor, inercia, gases, aerosoles)
 - Descripciones matemáticas
 - Ecuaciones diagnósticas y pronosticadas
 - Modelos de la turbulencia
 - Técnicas de medición
 - Modelización
- Instrumentación

Esquema de la Asignatura (Prácticas)

- Que “las prácticas” sean *prácticas*
- Vamos a buscar una actividad/tarea para cada alumno, *que sirva para algo*
- Si no
 - Manejo de herramientas básicas informáticas (Excel)
 - Trabajar en pequeños equipos
 - Análisis de datos micrometeorológicos
- Te todas maneras
 - Presentación de resultados
 - Redacción de un informe