

III. Alcanze de la Micrometeorología

Si se mueve con el viento, su transporte por la turbulencia en la capa límite será importante.

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

Bibliografía Bio-meteorológica

- Campbell, G. S. y Norman, J. M., Environmental biophysics. Springer-Verlag, 1993.
- Jones, H. G., Plants and Microclimate. Cambridge University Press, 1992.
- Monteith, J. L., Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, 1973.
- Seeman, J., et al., Agrometeorology. Springer-Verlag, 1979

Alcance de la Micrometeorología

- Intercambios energéticos
 - Flujo de calor Sensible (H)
 - Flujo de calor Latente (LE)
 - La razón de Bowen
- El flujo de momento
 - A escalas grandes
 - En la capa límite
- Intercambios de gases
- Intercambios de partículas

“Flujo” y “Densidad de Flujo”

- “Densidad de flujo” – por unidad de superficie
- Ejemplo Radiativo – emisión
 - Objeto A: cuerpo negro, 300K, dia. = 1cm
 - Objeto B: cuerpo negro, 300K, dia. = 10cm

$$F_b = \sigma T^4$$

- “Flujo”: integrado por toda la superficie de interés: objeto B tiene 100 veces más de flujo
- La diferencia es la superficie en cuestión

Micrometeorología: **todo** se normaliza por superficie

- Nos interesan las “Densidades de flujo”
- Pero somos perezosos, y no nos gusta decir “Densidad de Flujo” miles de veces
- Por ejemplo, “la densidad de flujo de calor latente” es un parámetro de mucha interés, pero tarda demasiado en decir
- Cuando decimos “Flujo”, se entiende que estamos hablando de densidades...

Unidades y Símbolos

Cantidad	(unidades)	(densidad de) Flujo	Expresión	(unidades)	Símbolo
Masa	(kg)	Flujo de masa	$\langle w\rho \rangle$	(Kg $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	-
Momento	(kg m s ⁻¹)	Flujo de momento	$\rho \langle wu \rangle$	(kg m s ⁻¹ $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ρu_*^2
Calor	(J)	Flujo de calor sensible	$\rho C_p \langle wT \rangle$	(J $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	H
Vapor de agua	(kg)	Flujo de calor latente	$L \langle w\rho_v \rangle$	(J $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	LE

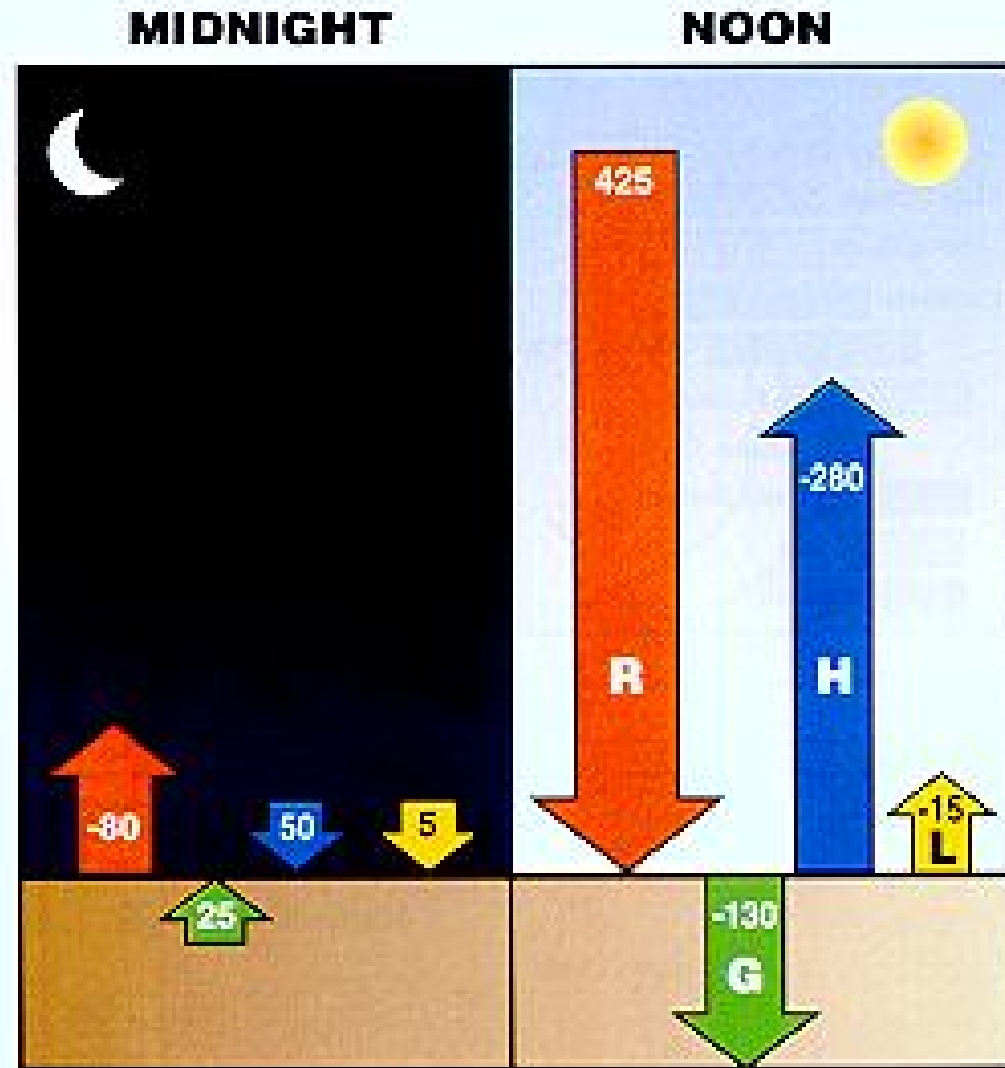
Alcance de la Micrometeorología

- Intercambios energéticos
 - Flujo de calor Sensible (H)
 - Flujo de calor Latente (LE)
 - La razón de Bowen
- El flujo de momento
 - A escalas grandes
 - En la capa límite
- Intercambios de gases
- Intercambios de partículas

Flujos Energéticos - Calor Latente y Sensible

- Los parámetros hidro-climatológicos de compartimiento (ejm: β)
- Dinámica de la capa límite
- Ecophysiology (Baldocchi, IERM)

LOS FLUJOS DE ENERGÍA EN UNA SUPERFICIE IDEAL



$$R_n = H + LE + G$$

Tipos de capa límite

Marítimo	Continental
Poca variabilidad diurna	Mucha variabilidad diurna
1-2 km (3 max, 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

FLUJOS DE ENERGÍA EN UNA SUPERFICIE IDEAL

$$R_n = H + LE + G$$

$$R_n - G = H + LE$$

$$\beta = H / LE \quad \beta \text{ RAZÓN BOWEN}$$

$$R_n = H + LE + G = \beta LE + LE + G = LE(1 + \beta) + G$$

$$LE = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)}$$

$$R_n = H + LE + G = H + \frac{H}{\beta} + G = H \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) + G$$

$$H = \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right) (R_n - G)$$

ÍNDICES ADIMENSIONALES DE USO COMÚN EN LA INVESTIGACIÓN

RAZÓN DE BOWEN

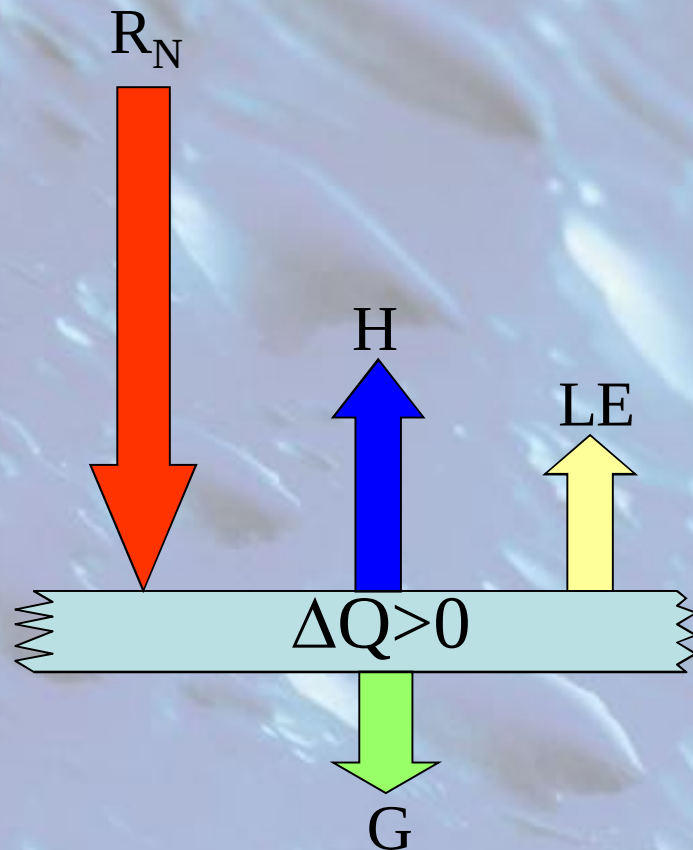
$$\beta = H / LE$$

RAZÓN EVAPORATIVA (EVAPORATIVE FRACTION; E.F.)

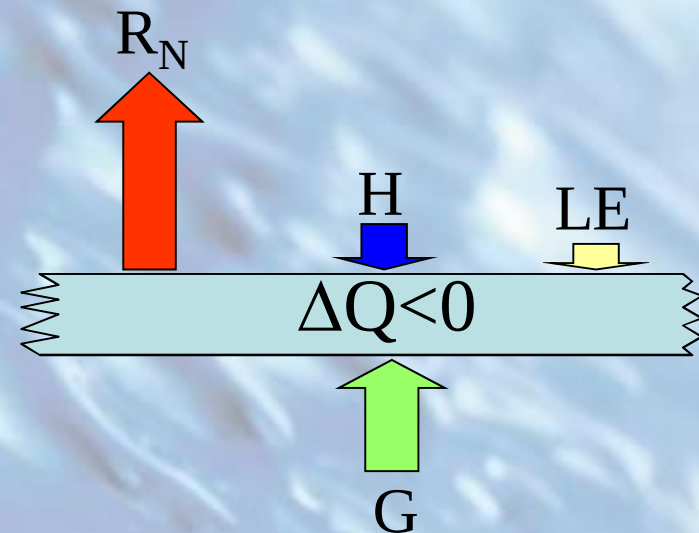
$$E.F. = \frac{LE}{(LE + H)} = \frac{1}{(1 + \beta)}$$

FLUJOS DE ENERGÍA EN UNA CAPA. CONVERGENCIA Y DIVERGENCIA DE FLUJO

Día



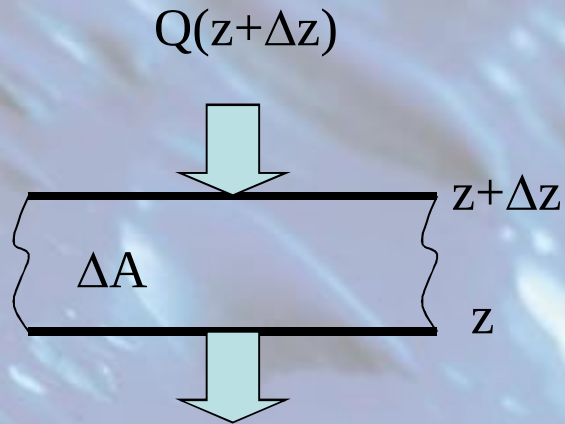
Noche



CONVERGENCIA DEL FLUJO

La convergencia del flujo

$$Q(z + \Delta z)\Delta A - Q(z)\Delta A = \\ \left[(Q(z) + (\partial Q / \partial z)\Delta z) - Q(z) \right] \Delta A = \\ (\partial Q / \partial z)\Delta z \Delta A$$



Calienta la masa del volumen

$$\frac{\partial Q}{\partial z} \Delta z \Delta A = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta A \Delta z c_p T)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T)$$

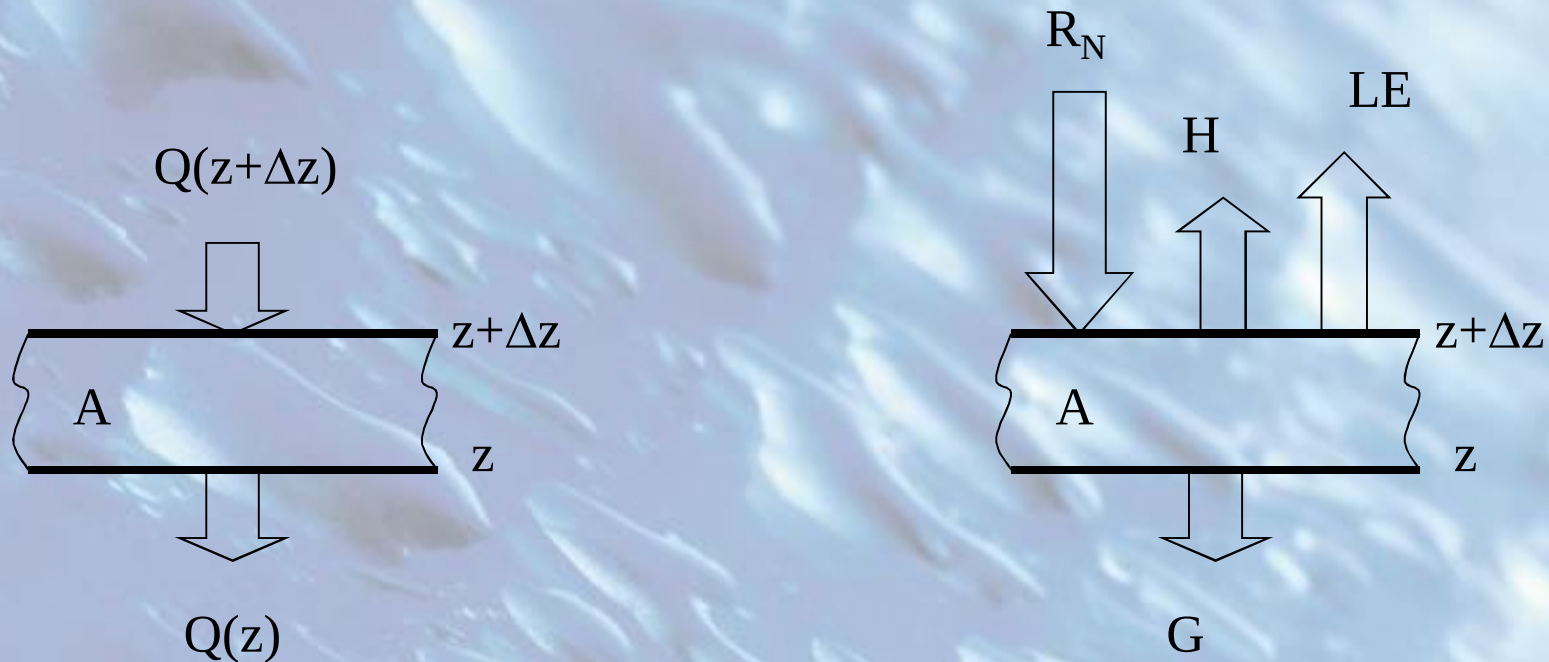
FLUJOS DE ENERGÍA EN UNA CAPA

Término residual, ΔQ

**Hipótesis: toda la energía
sirve para calentar la
capa**

$$R_n = H + LE + G + \Delta Q$$

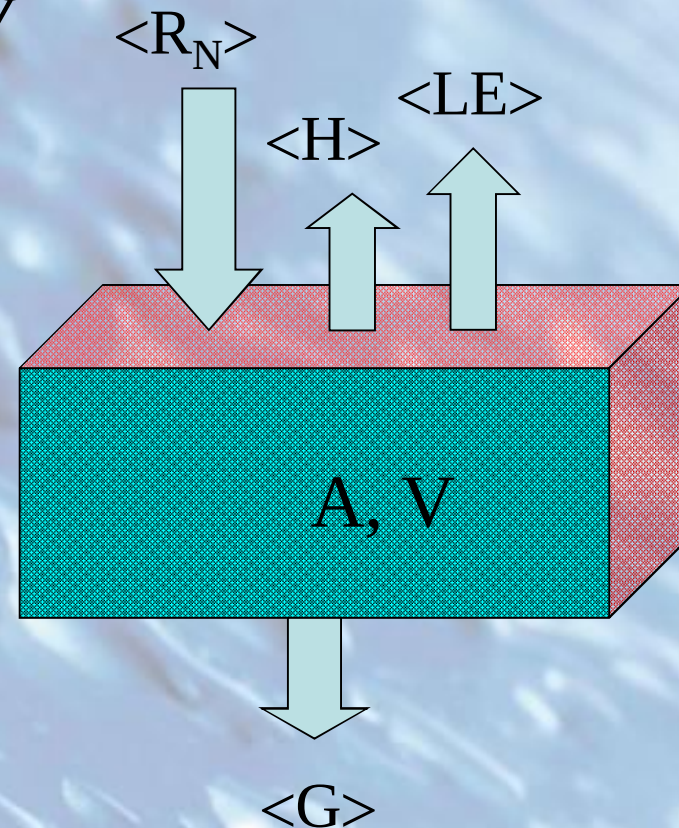
$$\Delta Q = \int_{\Delta z} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) dz$$



FLUJOS DE ENERGÍA EN UN VOLUMEN DE CONTROL

$$\langle R_n \rangle = \langle H \rangle + \langle LE \rangle + \langle G \rangle + \langle \Delta Q \rangle$$

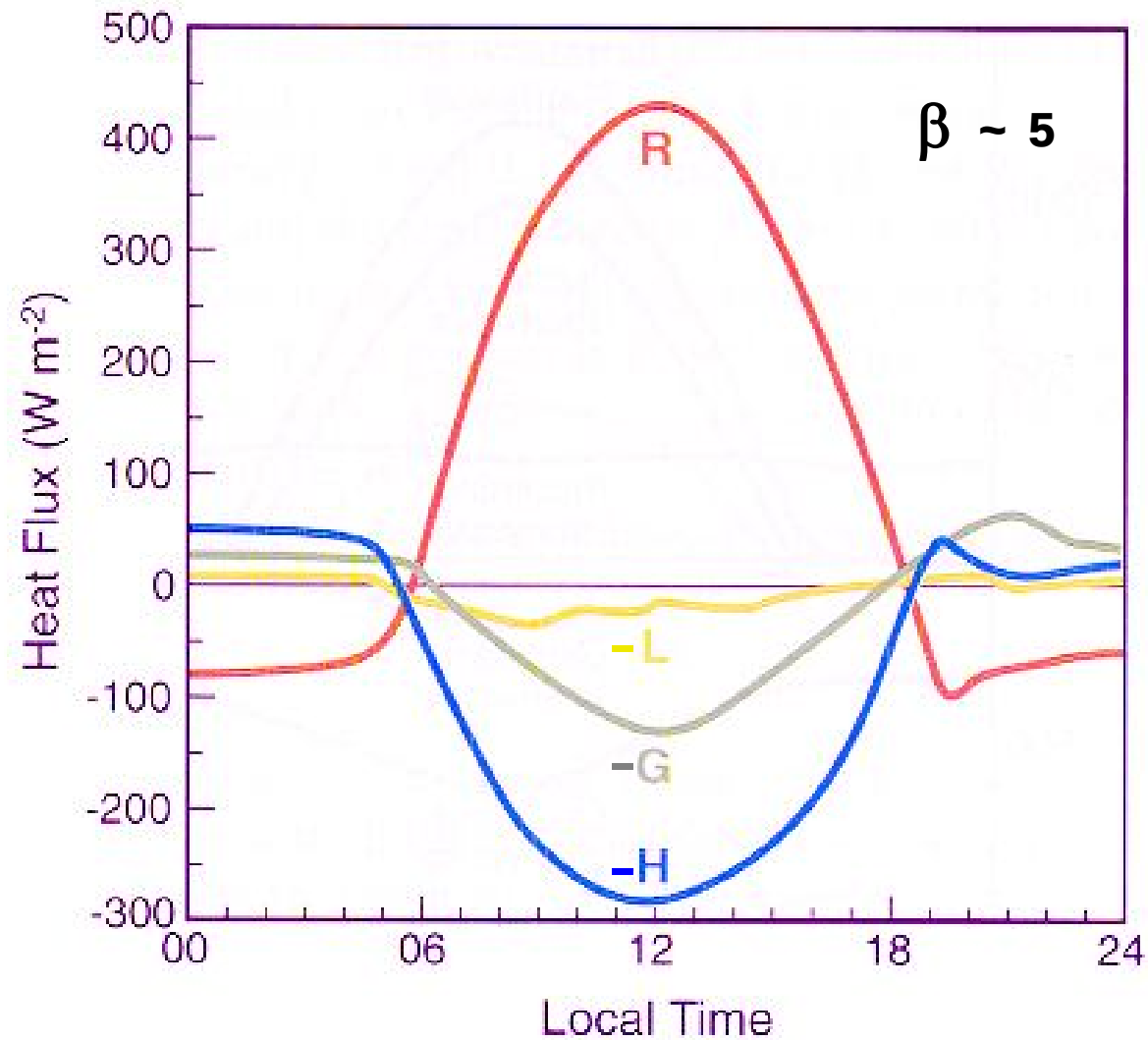
$$\langle \Delta Q \rangle = \frac{1}{A_{Vcont}} \int \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) dV$$



Volúmenes de control

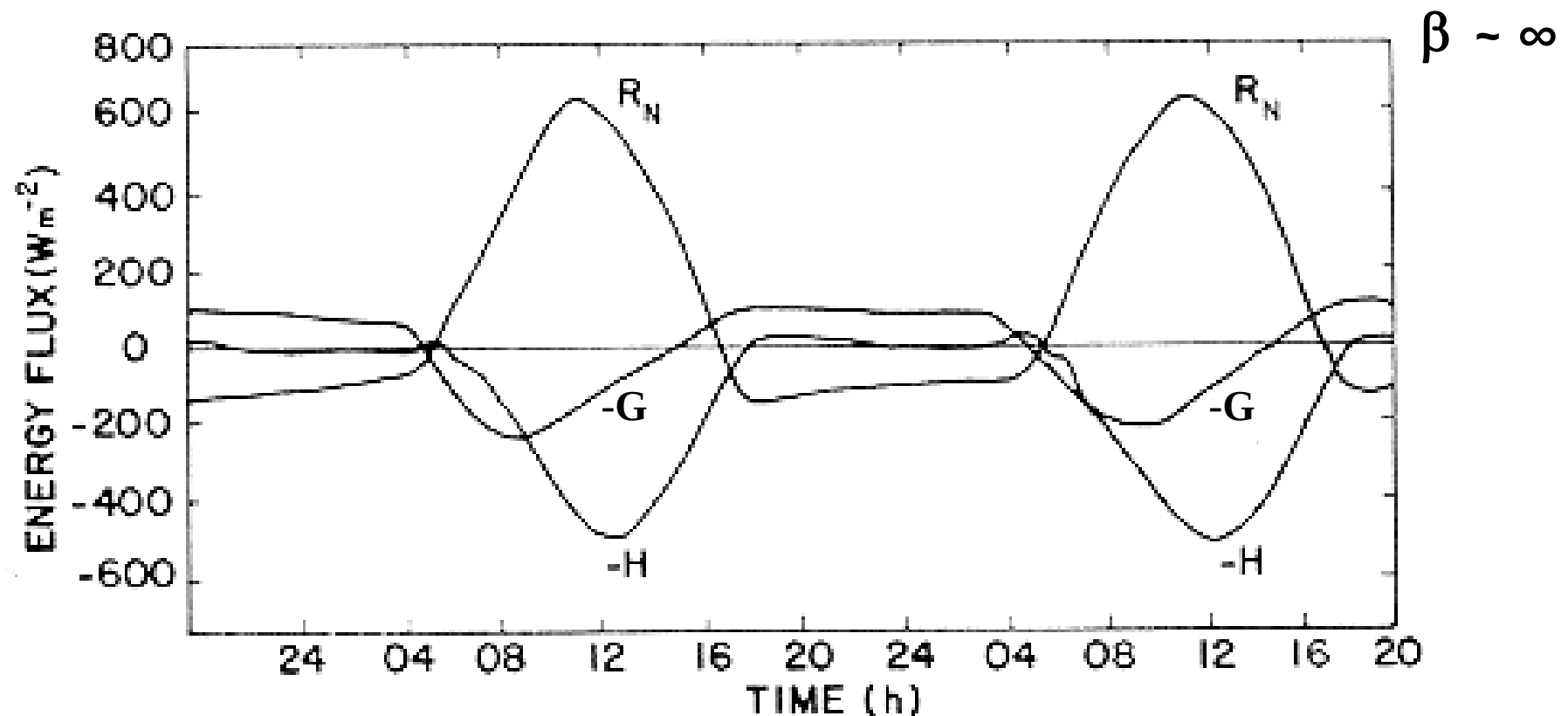
- Biológicos
 - Un cultivo
 - Un invernadero
 - Una planta o un animal
 - Una hoja u otro órgano
- Otros elementos de interés
 - Un embalse
 - Un parking (?)
 - Otro

VARIACIÓN DIARIA DEL BALANCE DE ENERGÍA



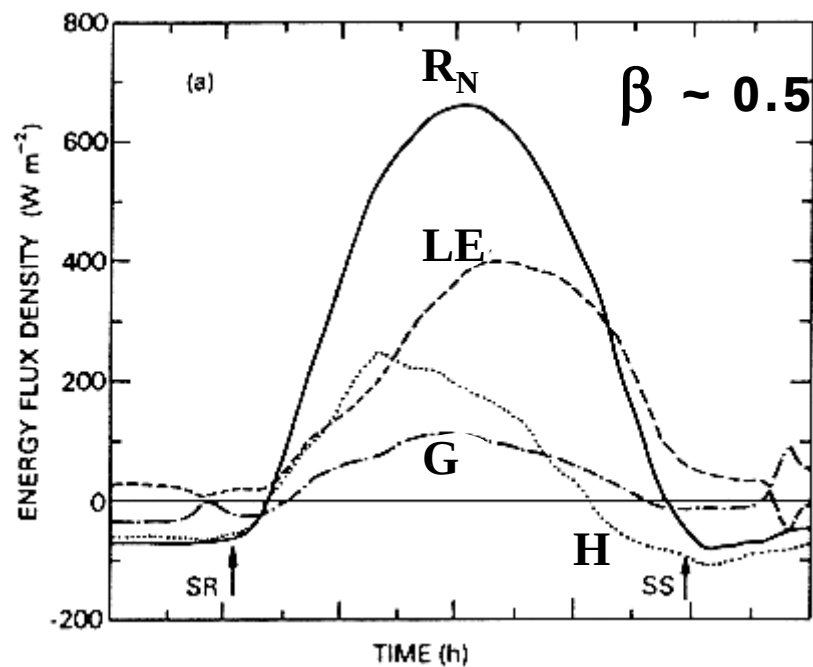
$$R_n = H + LE + G$$

VARIACIÓN DIARIA DEL BALANCE DE ENERGÍA. LECHO SECO DE UN LAGO.

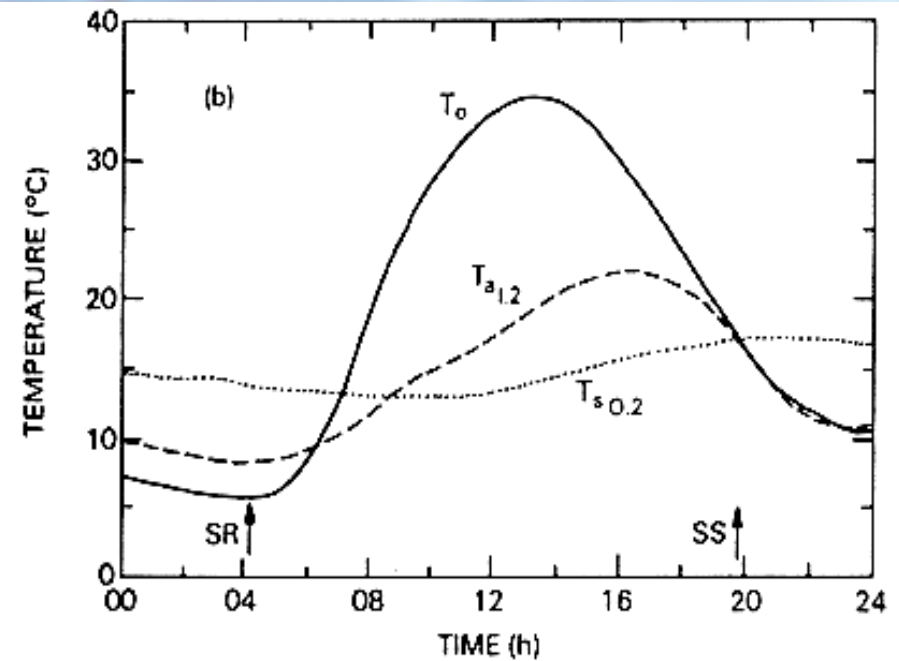


VARIACIÓN DIARIA DEL BALANCE DE ENERGÍA. SUELO DESNUDO Y MOJADO.

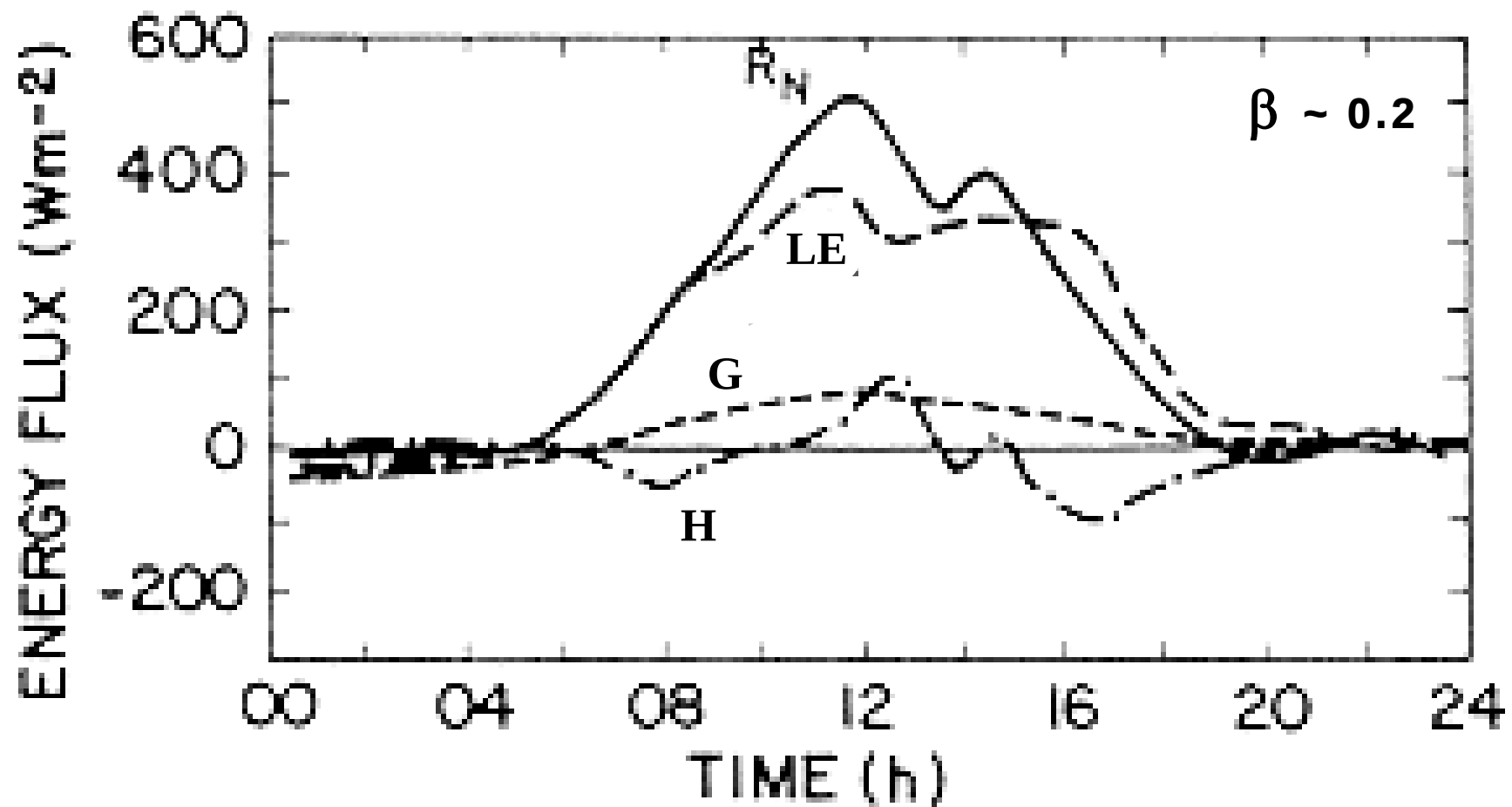
Balance de Energía



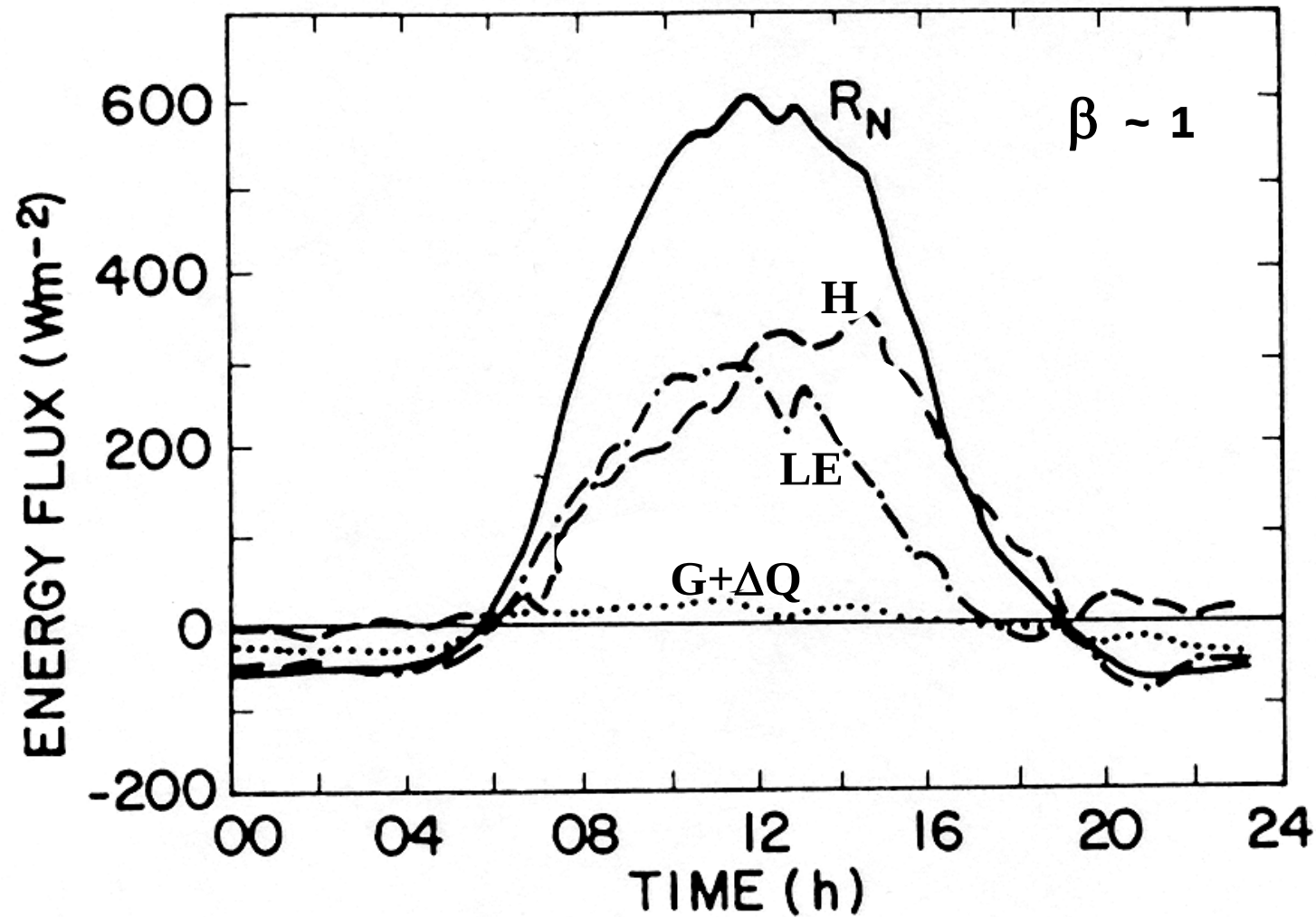
Temperaturas



VARIACIÓN DIARIA DEL BALANCE DE ENERGÍA. CAMPO DE CEBADA



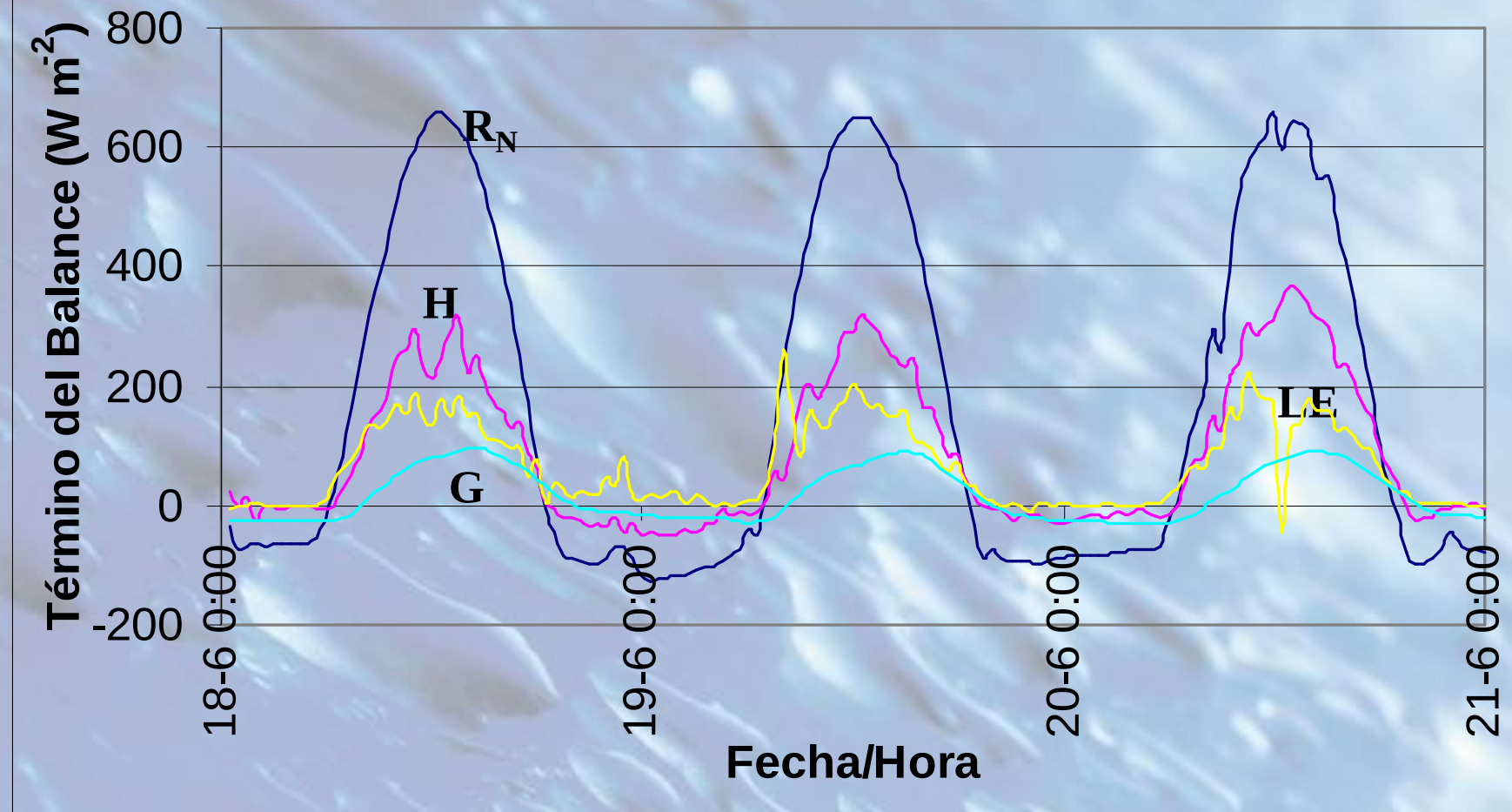
VARIACIÓN DIARIA DEL BALANCE DE ENERGÍA. DOSEL DE ABETO DOUGLAS.



Almería, Junio 2004

Gádor - Balance de Energía

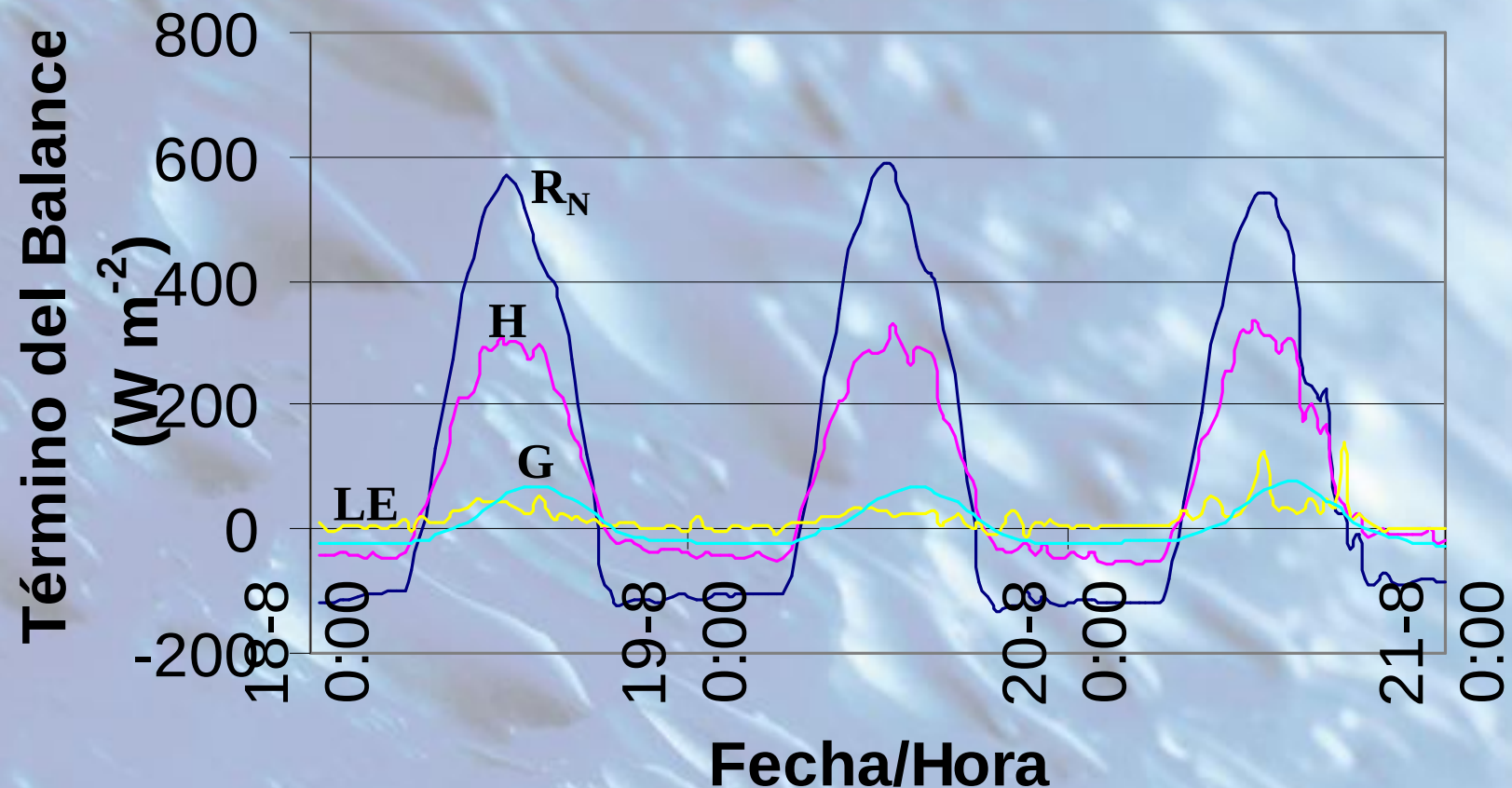
$\beta \sim 1.5$



Almería, Agosto 2004

Gádor - Balance de Energía

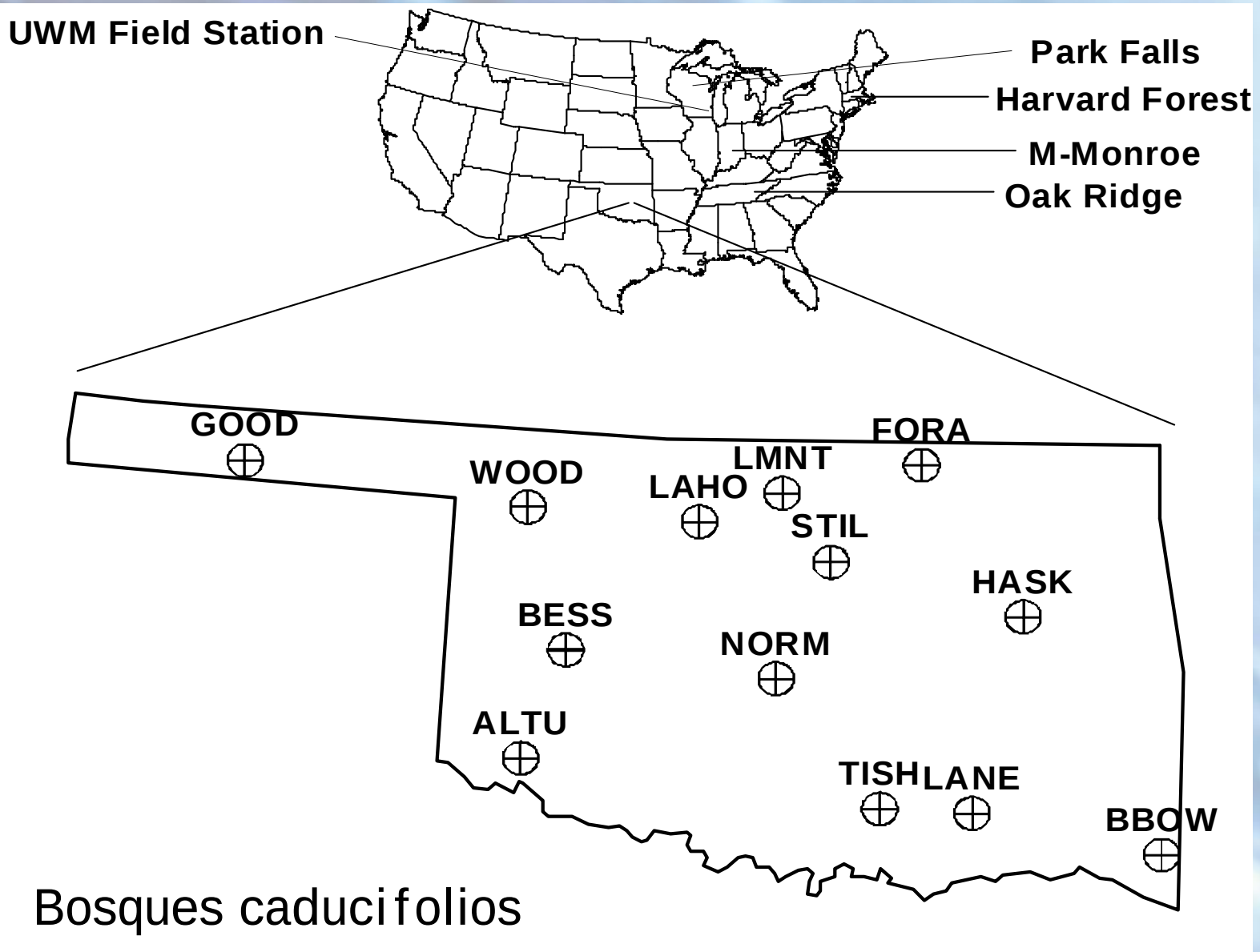
$\beta \sim 5$



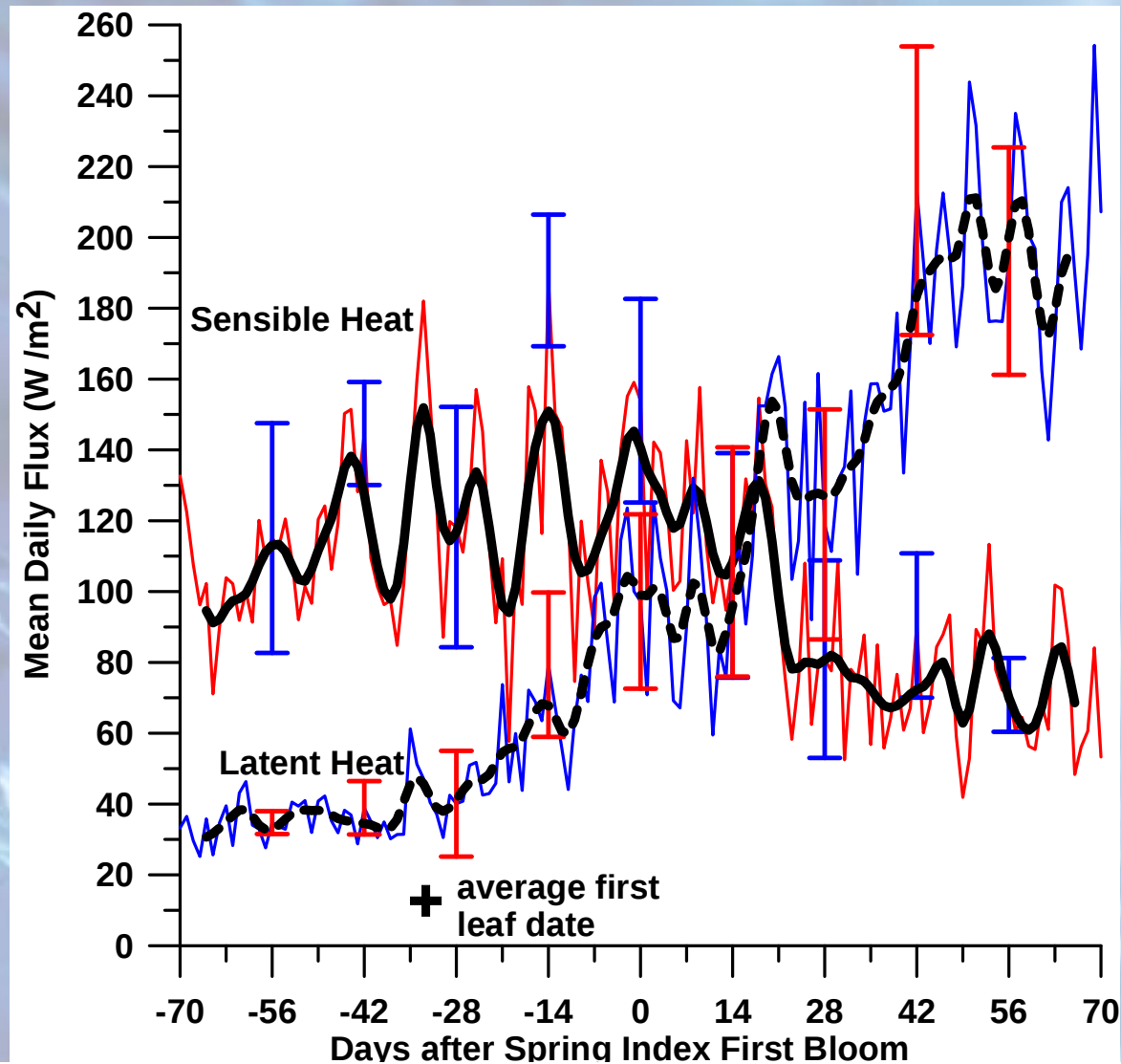
Importancia de la partición entre H y LE

- Cuanto más H, más caliente está la superficie
 - Porque H se debe a la diferencia de temperatura superficie/aire*
 - Importante porque una T muy alta es mortal para los organismos
- Cuanto más LE, más se está secando la superficie
 - Porque LE se debe a la diferencia de humedad superficie/aire*
 - Esto permite cierto control de la parte de los organismos (plantas)
- *Luego: la relación entre flujos y gradientes

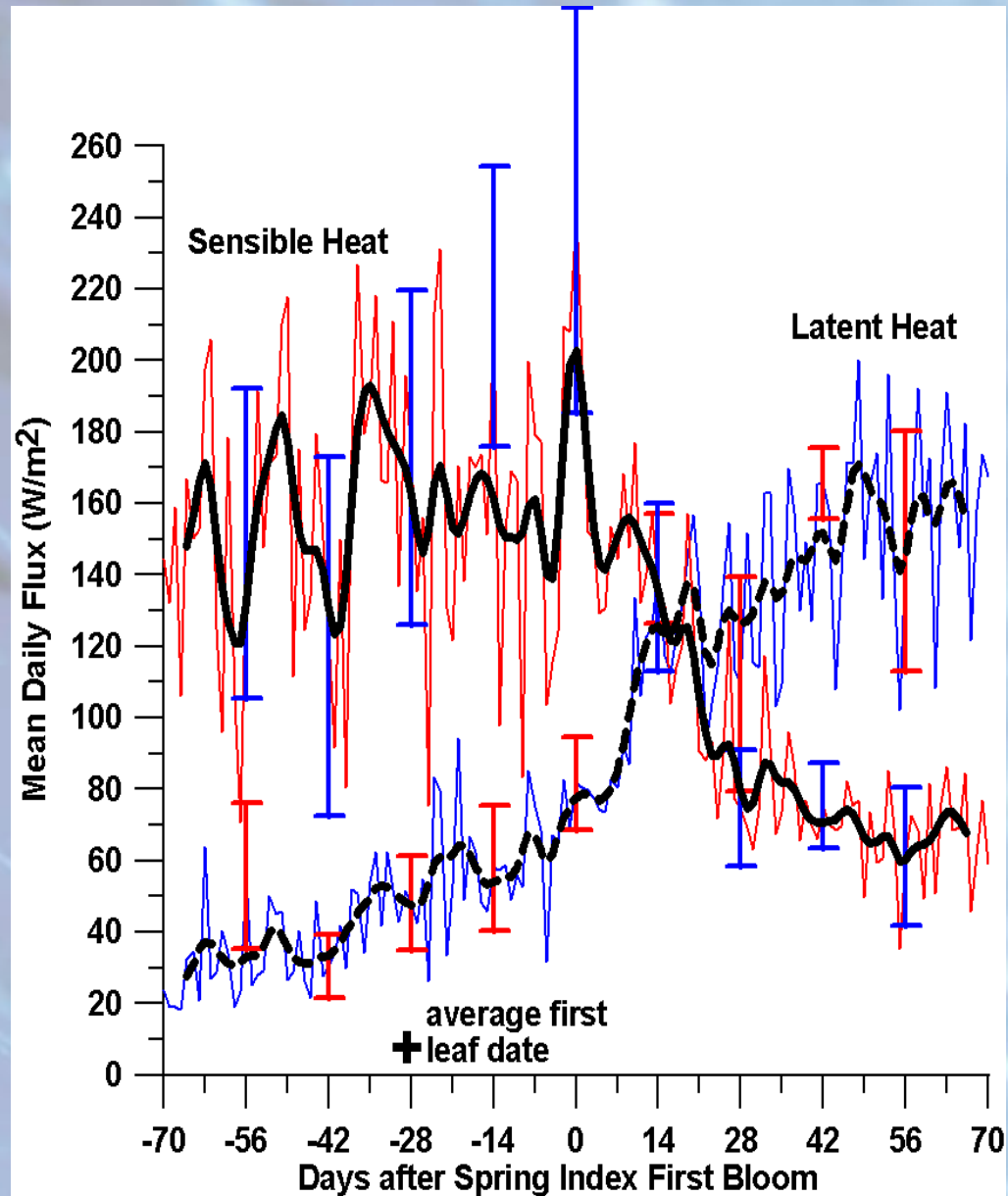
Station Locations: University of Milwaukee (Dept. of Geography)



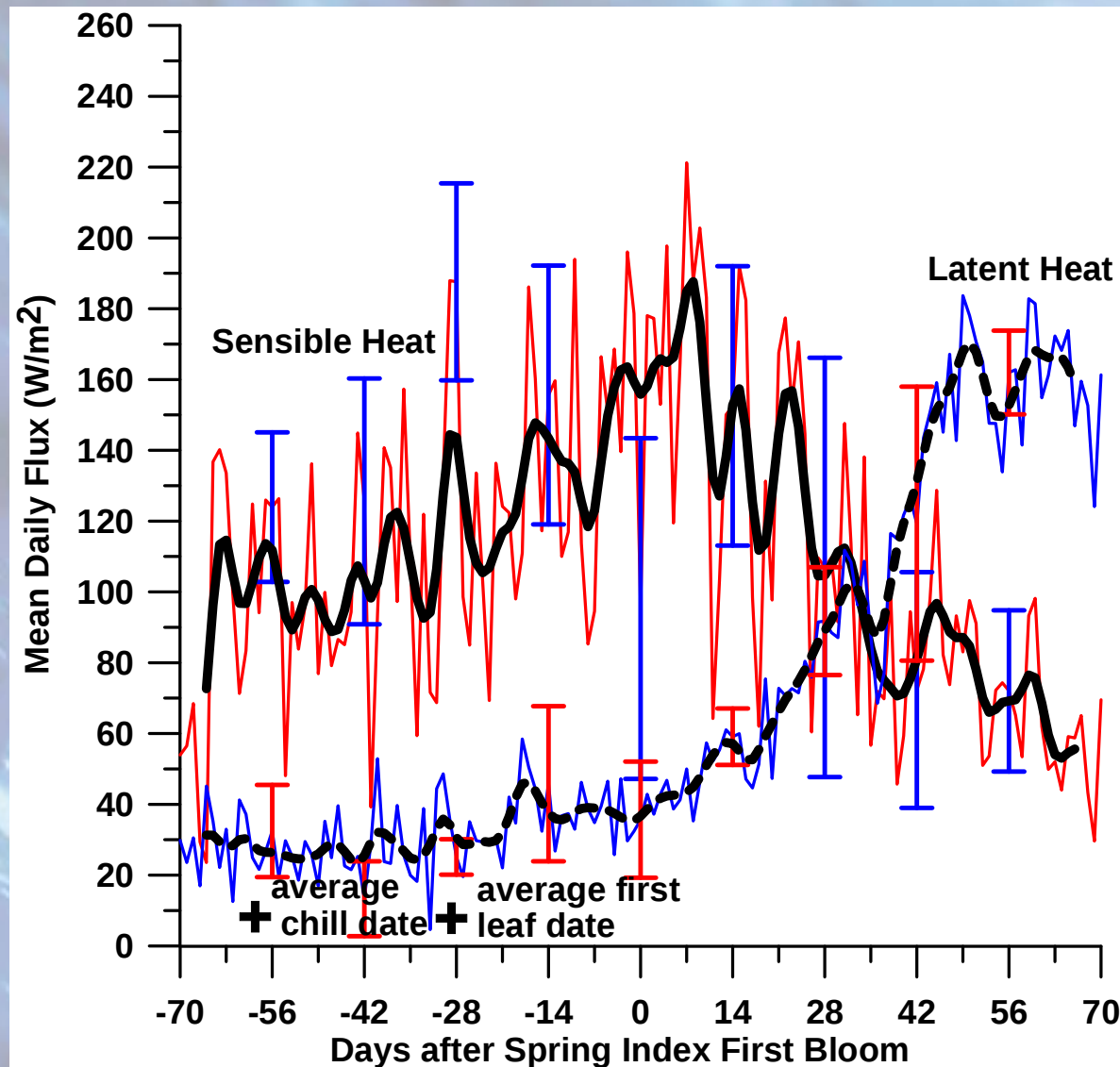
Flux Changes Relative to First Bloom Spring Index; Lamont, OK 1994-1998



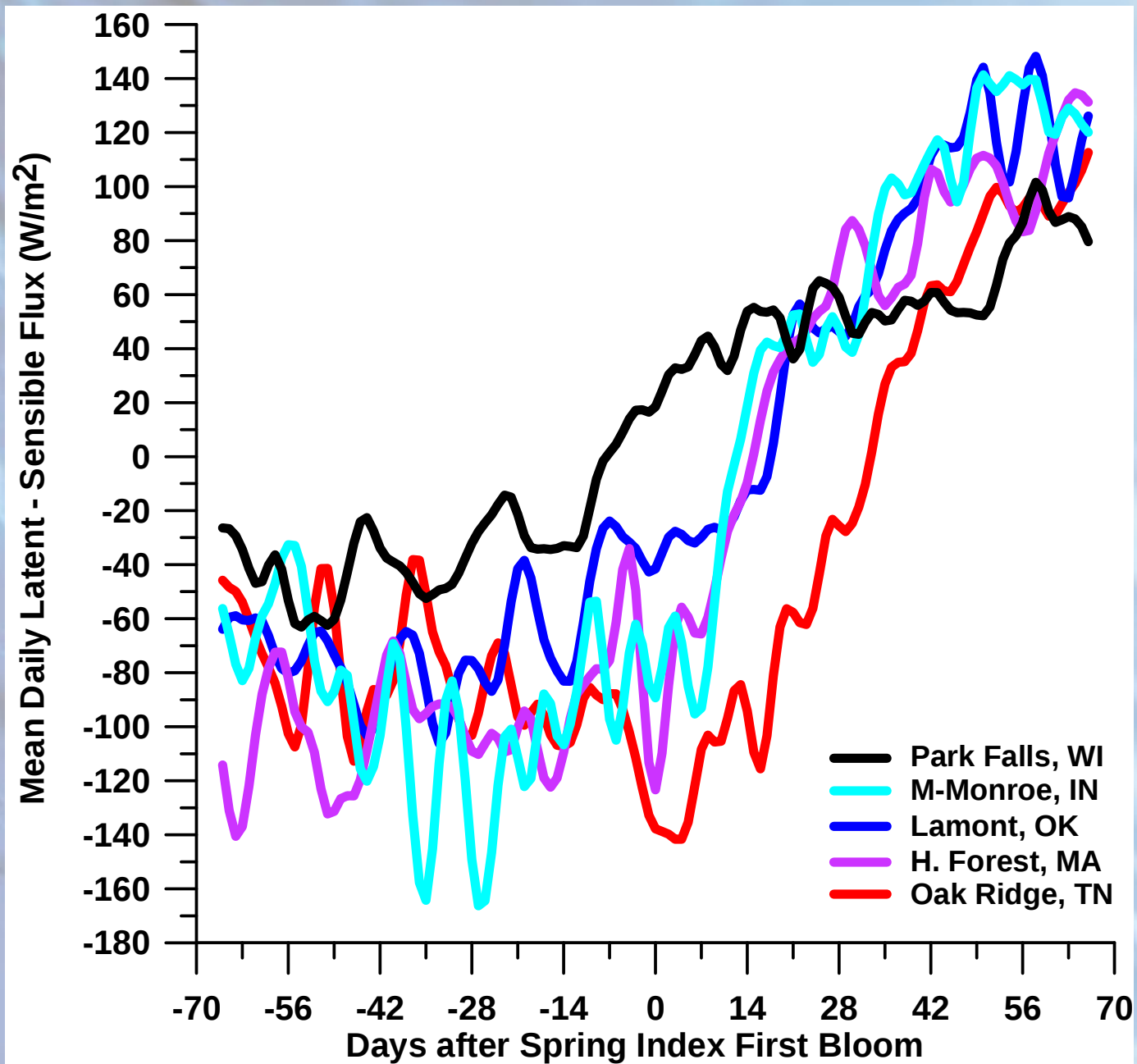
Flux Changes Relative to First Bloom Spring Index; Harvard Forest, MA 1992-2000



Flux Changes Relative to First Bloom Spring Index; Oak Ridge, TN 1996-2000



Comparativa: LE - H



Control de las plantas

- Si la planta suelta agua, puede bajar β
 - Impide que suba mucho la T
 - Pierde agua
- Necesita acceso al agua subterránea
 - Si no, la pérdida de agua causa un estrés
 - Reacción fisiológica: cerrar los poros (estomas)
 - Reacción drástica: morir (sequía)
- Importancia del agua para las plantas

Implicaciones para la atmósfera

- Crecimiento de la capa límite
 - The “Entrainment rate” is proportional to the buoyancy flux $w_e \propto \overline{w'\theta_v'}$
 - Depende sobre todo de la temperatura
 - Pequeño papel de la humedad
 - Alta $\beta \rightarrow$ más crecimiento
- Energía que caliente ... activa
- Energía que evapora ... puede estancar (ejm, niebla marítima)

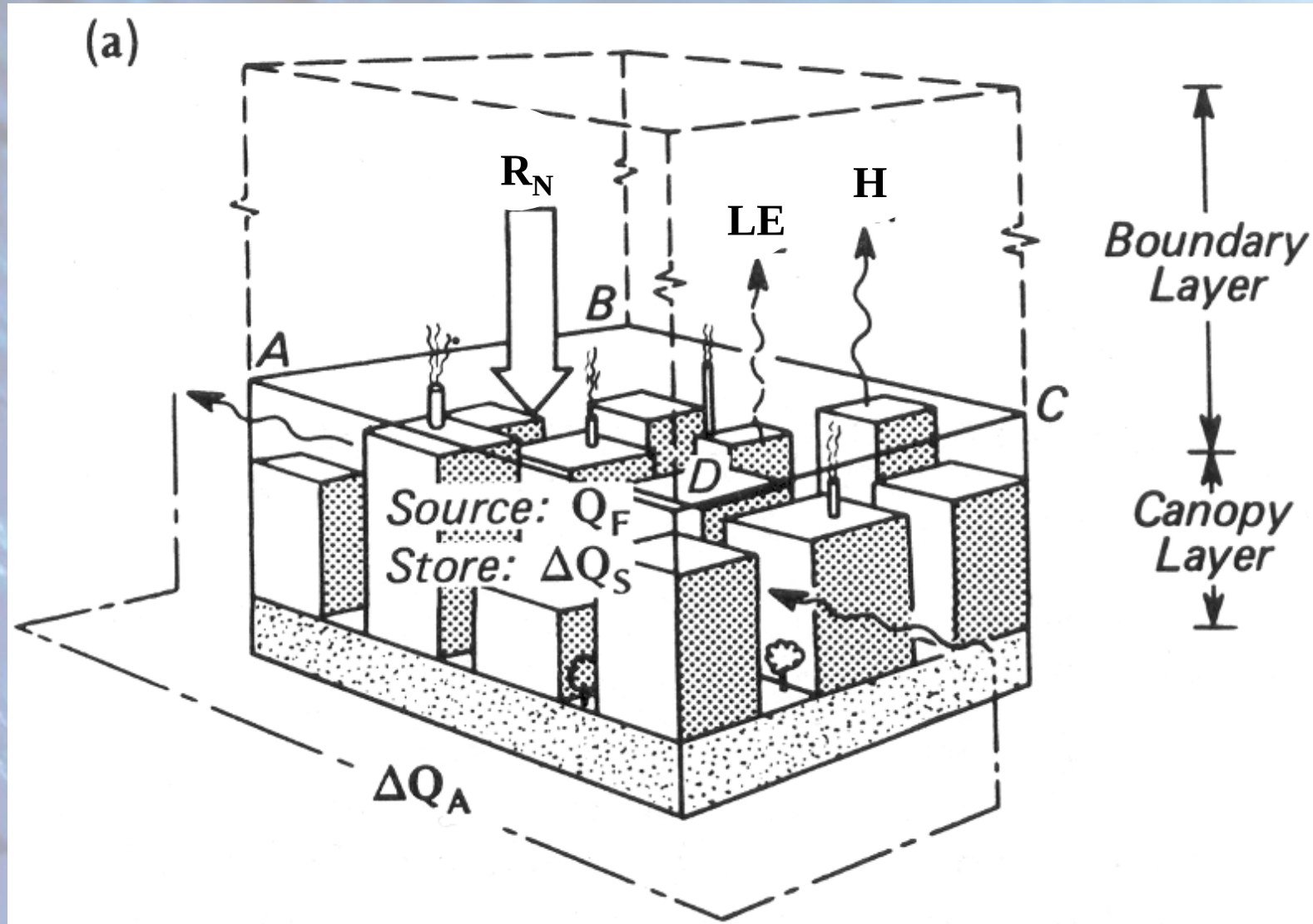
La climatología urbana



Urbanización

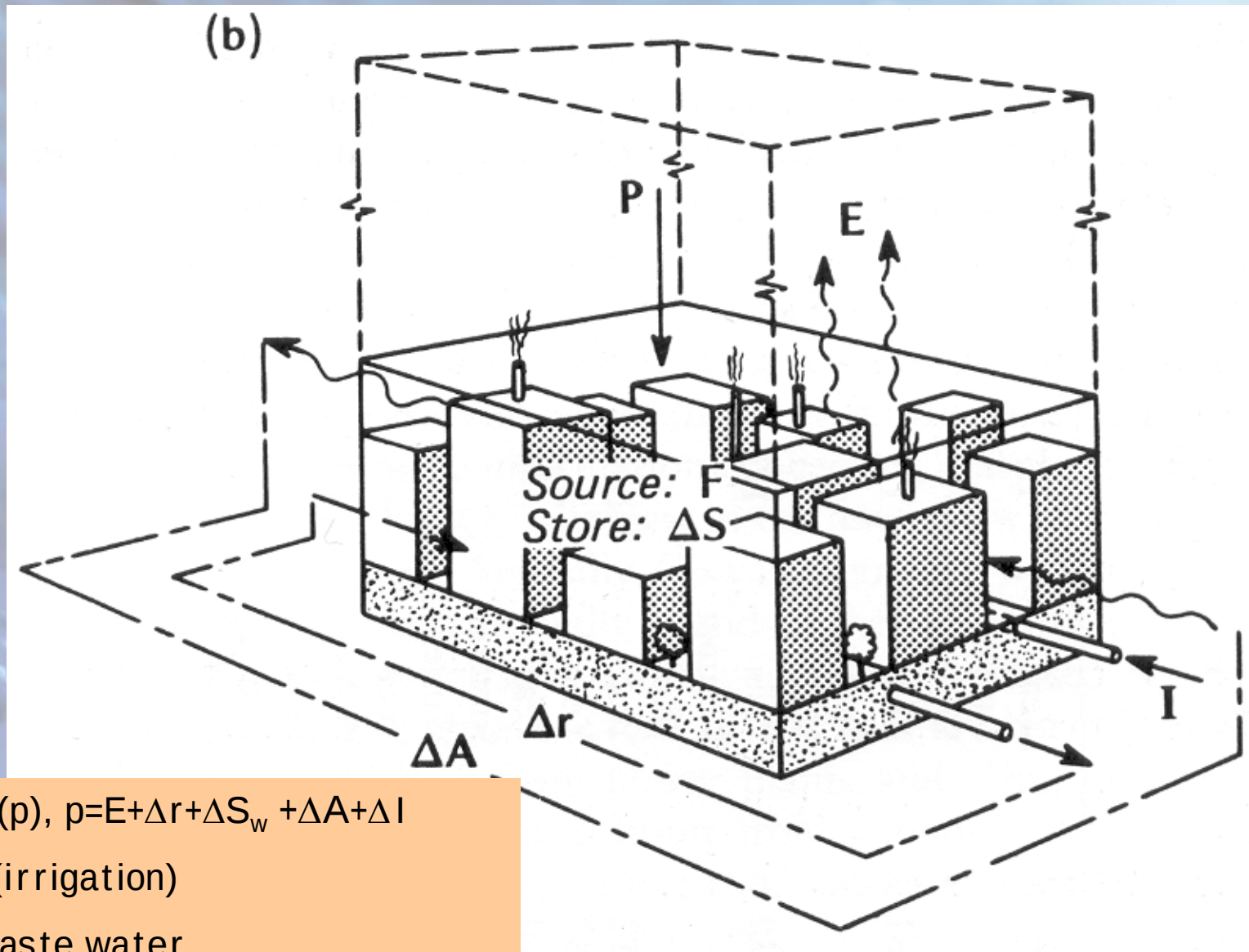
50% de la población mundial vive en un ambiente urbano
Se prevé 65% para 2025

Urban Canopy Energy Balance



Source: Oke (1987), fig 8.7

Urban Canopy Water Budget



Water Budget (p), $p = E + \Delta r + \Delta S_w + \Delta A + \Delta I$

ΔI = imported (irrigation)

Δr = runoff + waste water

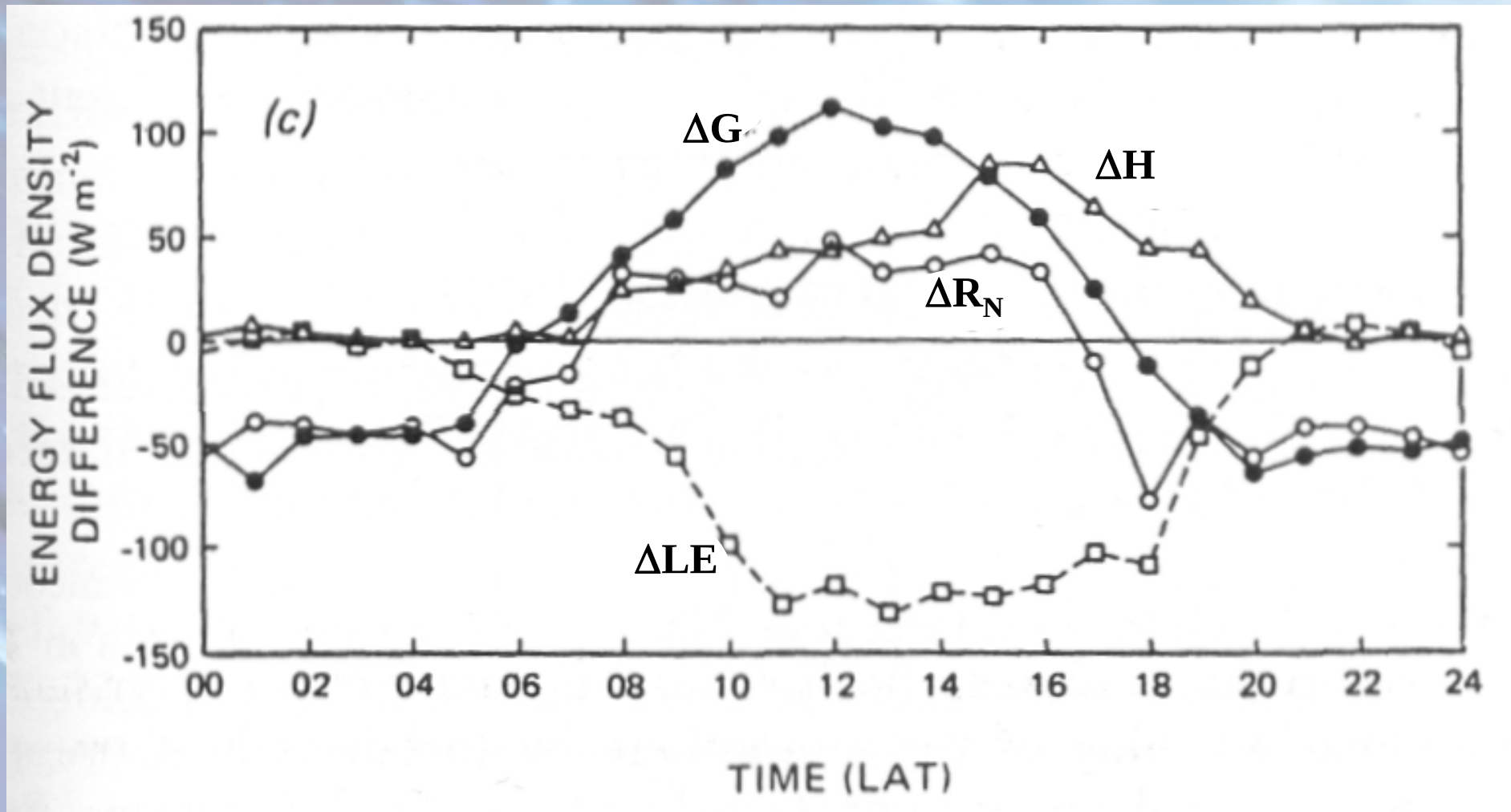
ΔS_w = stored water

Source: Oke (1987), fig 8.7

Climas Urbanos

- La superficie urbana difiere radicalmente del caso rural
 - Propiedades radiativas, termodinámicas, y aerodinámicas
 - Cambios de temperatura, humedad, precipitación, visibilidad, flujos de calor, profundidad PBL, etc.
- Penacho (“Plume”) de contaminación puede extender hasta 100s de km con el viento

Diferencias en el balance de energía, Sub-urbano (s) y Rural (r)



Oke (1987)

Diferencias: s - r

Urban Heat Island Effect (UHIE) Arya 14.5.1

Isotermas peri-urbanos que se parecen a una isla

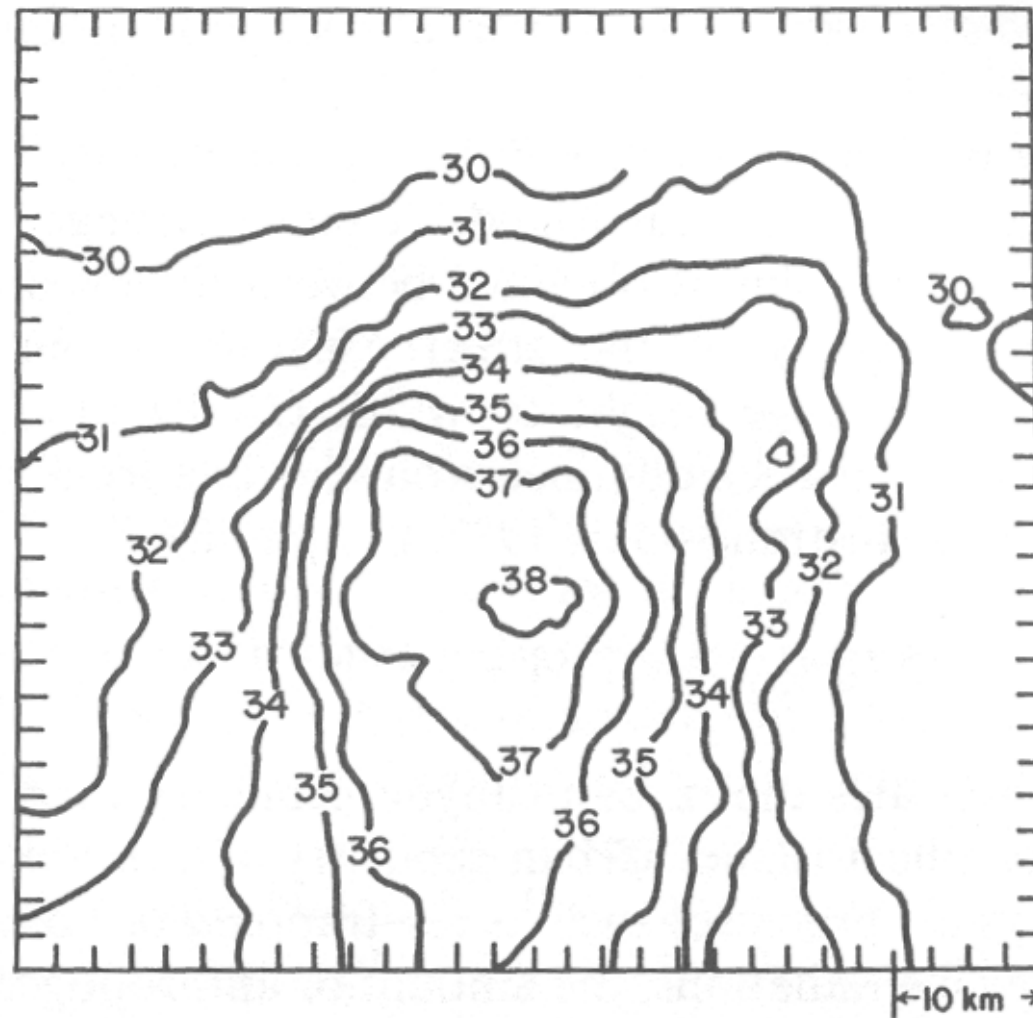


Figure 14.10 Observed patterns of ground-surface temperatures showing the heat-island phenomenon over the Saint Louis Metropolitan area during RAPS. [After Byun (1987).]

Urban Heat Island Effect (UHIE) Arya 14.5.1

- Isotermas peri-urbanos que parecen a una isla
- Procesos diabáticos y antropogénico
 - Combustión de fuel
 - Generación de energía
- Materias artificiales
 - Más conducción y capacidad calorífica que las naturales
 - Menos albedo (asfalto)
- Las ciudades tienen menos vegetación/suelo
 - Menos evapotranspiración (ET)
 - Más escorrentía
 - Menos agua disponible en superficie para el enfriamiento evaporativo
- Heat island intensity: $DT = T_u - T_r$

Urban 'Heat Island' y Población

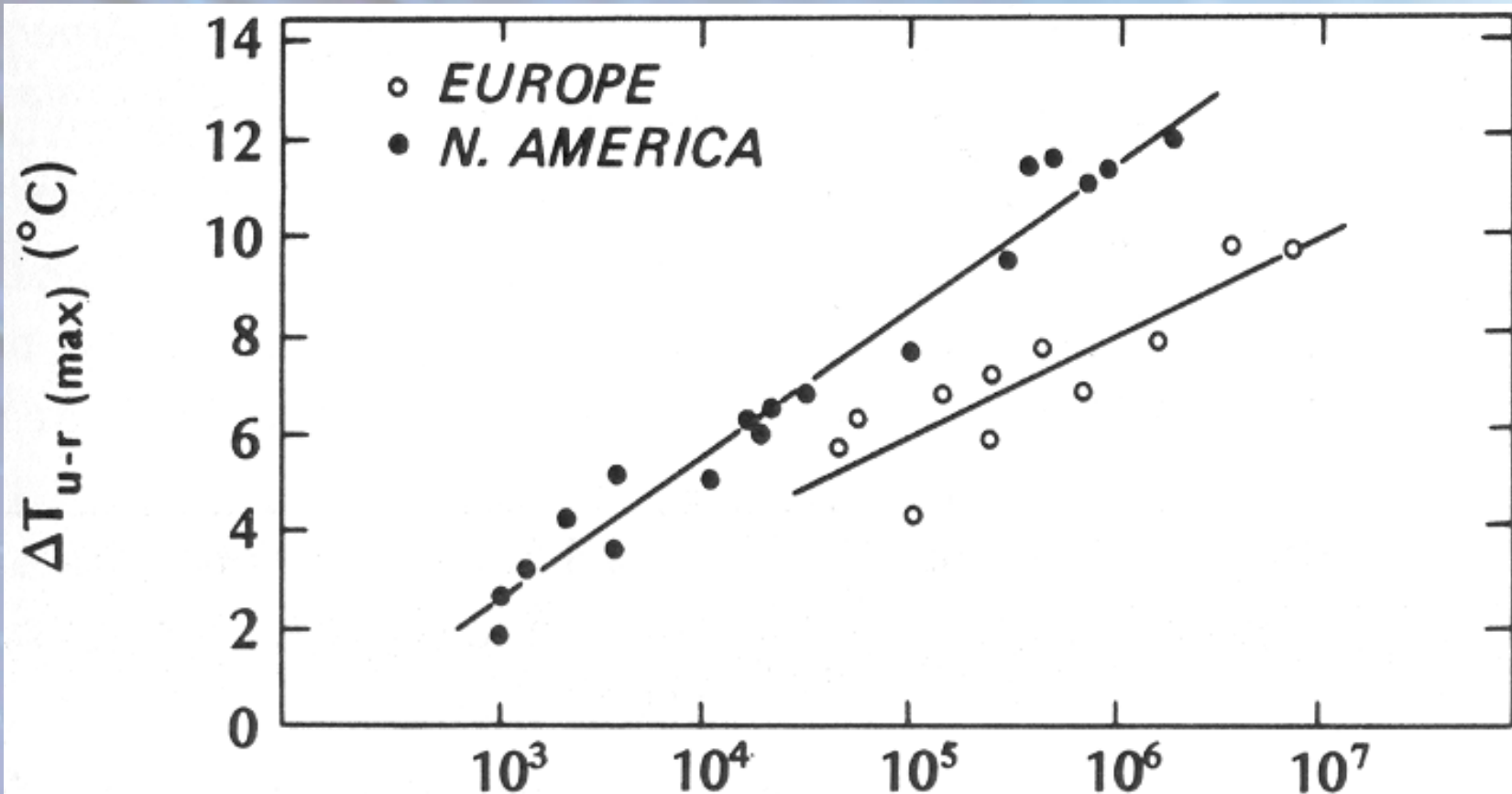


Figure 8.15 Relation between maximum observed heat island intensity ($\Delta T_{u-r(\text{max})}$) and population (P) for North American and European settlements (modified after Oke, 1973).

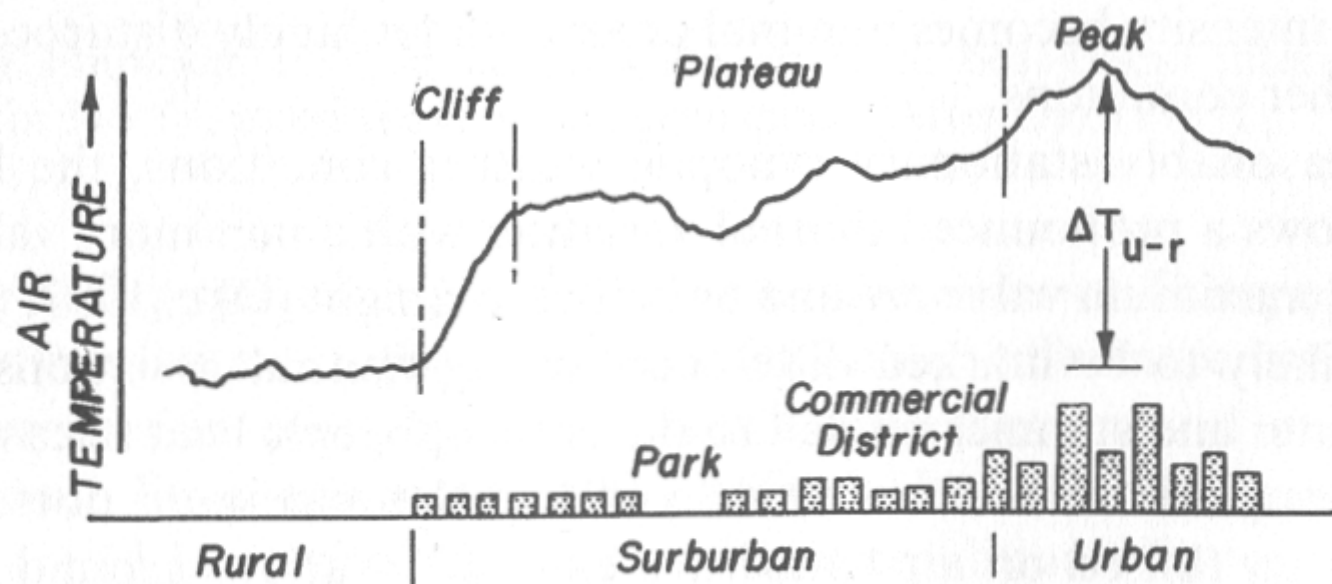
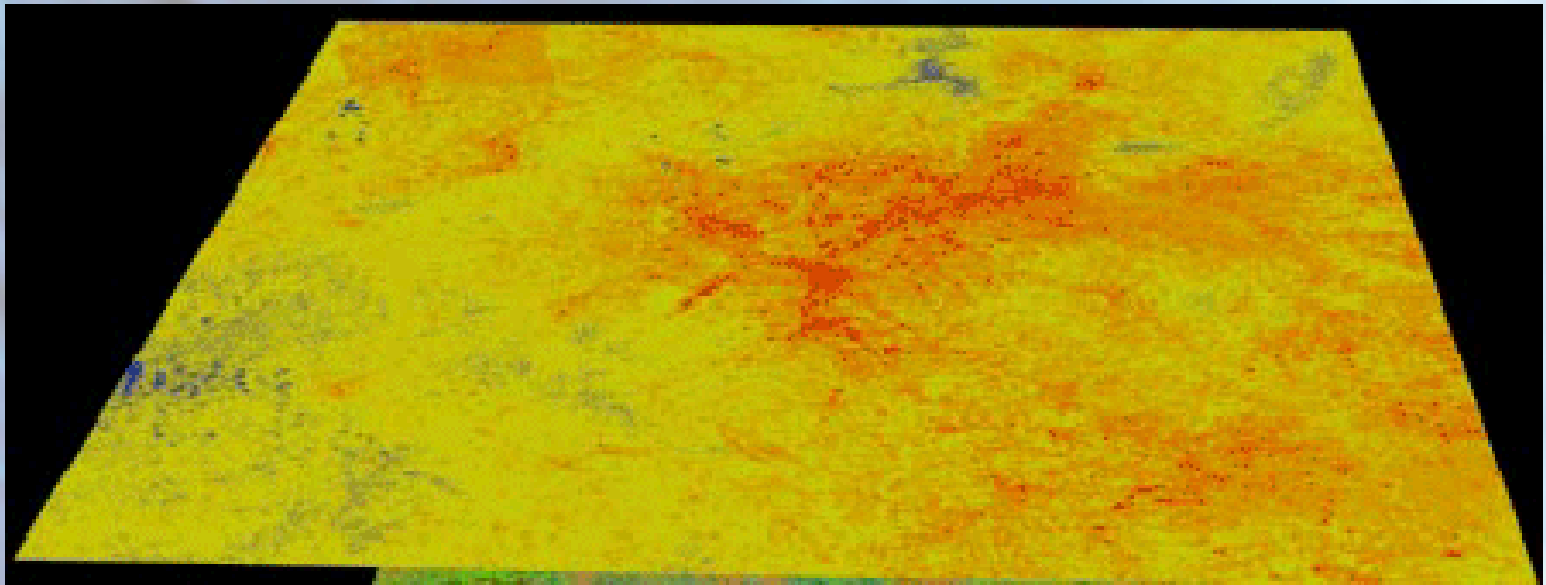


Figure 14.8 Schematic representation of variation in air temperature in going from a rural to an urban area. [After Oke (1987).]

Landsat Satellite Image of Salt Lake City, UT, USA

Thermal
Image



Visible
Image



Source: NASA/EPA http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/uhipp/urban_slc.html

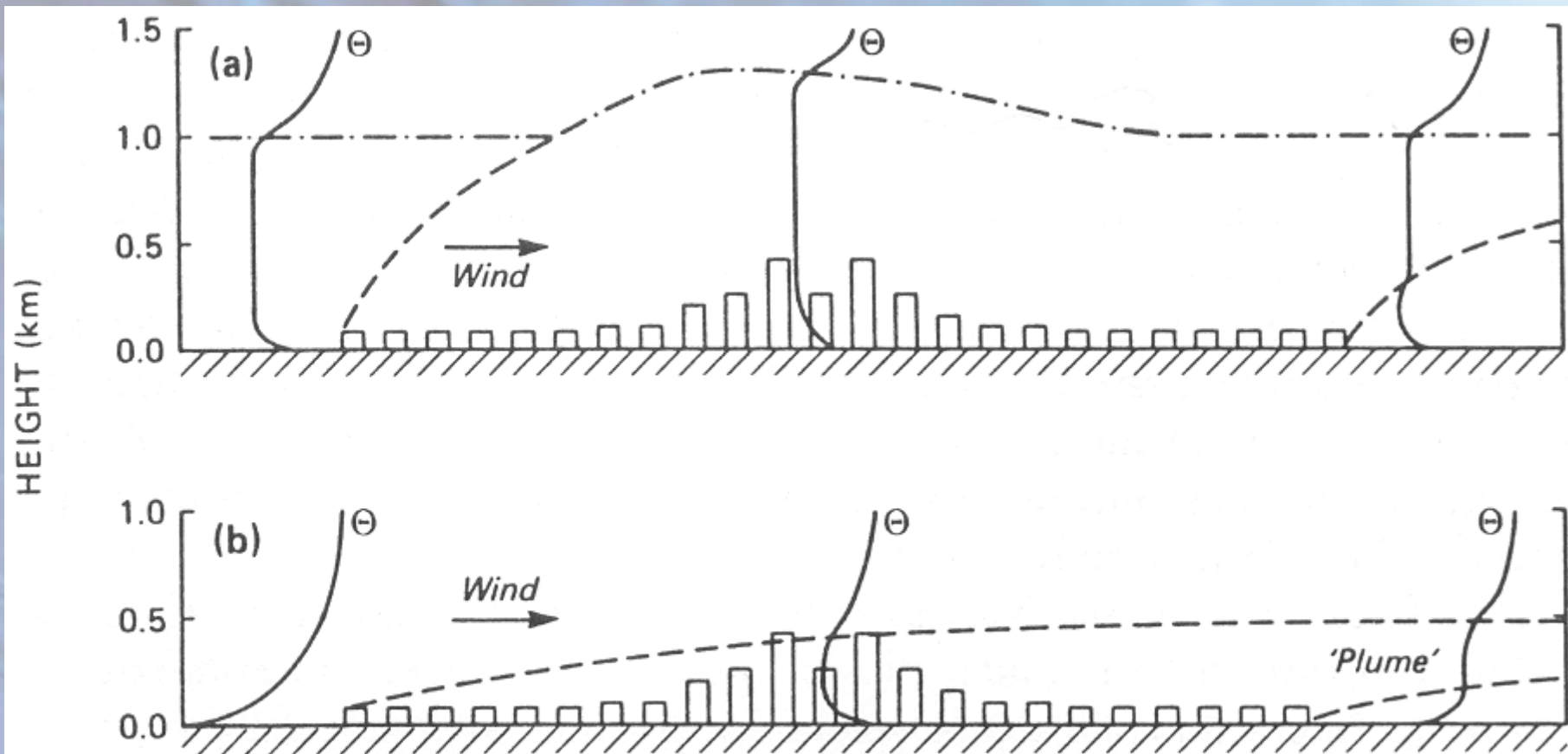


Figure 8.19 The thermal structure of the UBL in a large city during fine weather. Schematic profiles of potential temperature (Θ) (a) by day and (b) at night (after Oke, 1982).

UHIE Mitigation: Roof Top Gardens

- reduce air temperature
- reduce water drainage problems
- increase agricultural area
- improve air quality
- improve aesthetics
- improve mental health



City Hall, Chicago, IL



City Hall, Chicago, IL

The Urban Boundary Layer (UBL) Arya 14.5.2

- Modified by urban heat island effect and increased surface roughness.
 - Roughness island
- In calm winds, thermal effects dominate over roughness effects.
- thermally induced circulation

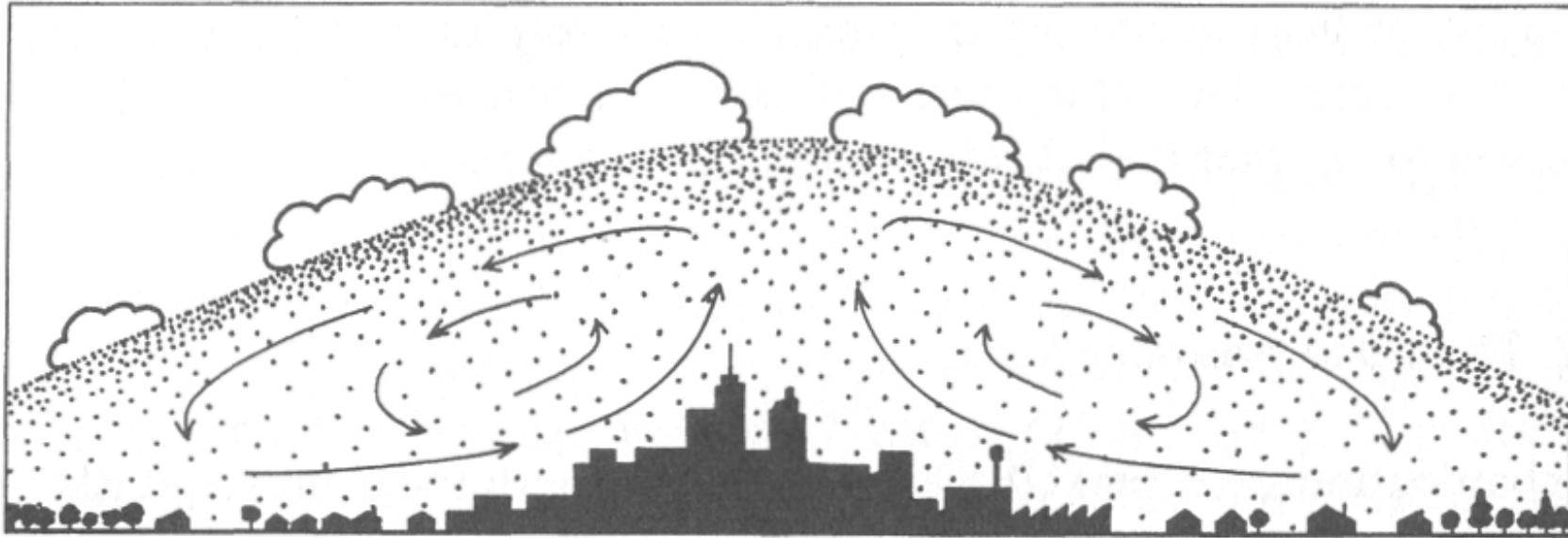


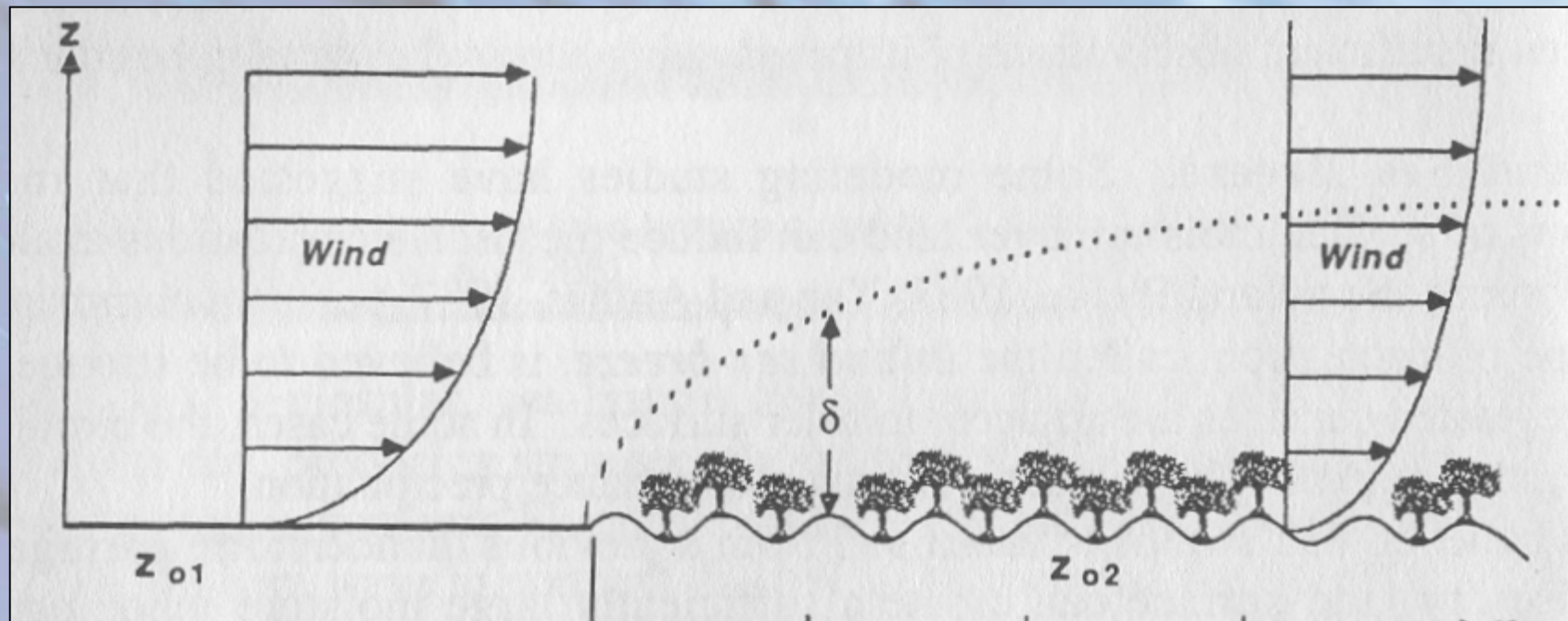
Figure 14.12 Schematic of dust dome and thermally induced circulations over a large city under calm or light winds. [After Lowry (1967). Copyright © (1967) by Scientific American, Inc. All rights reserved.]

a.k.a. mixed layer dust dome (Arya, 2001)

Alcance de la Micrometeorología

- Intercambios energéticos
 - Flujo de calor Sensible (H)
 - Flujo de calor Latente (LE)
 - La razón de Bowen
- El flujo de momento
 - A escalas grandes
 - En la capa límite
- Intercambios de gases
- Intercambios de partículas

Rugosidad y fricción



El papel de la fricción a escalas grandes

- Frenar el aire
- Convergencia en las borrascas
 - Producción de la lluvia
 - Ver video “gravity well”

El flujo de momento en la micrometeorología

- La 2ª Ley de Newton:
- Fuerza aplicada = cambio de momento
- Pregunta: ¿Con qué fuerza la superficie restringe la atmósfera?
- Contestación: El flujo de momento (densidad de flujo de fuerza)

El flujo de momento: ρu_*^2

- La densidad del aire: ρ
- La “velocidad de fricción”: u_*
 - Para la turbulencia generada mecánicamente, u^* es una variable que permite modelizar muchos procesos distintos en la capa límite
 - Es una de las bases de la “Teoría de Similitud” (más tarde)

Flujos de “contaminantes”: CO₂

- Objetivos del Protocolo de Kyoto:

- Ya se sabe: reducción de emisiones

- Artículo 2.1.a.ii sobre los “sumideros”

- Protección y Aumento

- Pero sin saber: ¿qué son?

- Artículo 5: hay que medir

- El funcionamiento de los ecosistemas (ecofisiología)

- Fotosíntesis

- Respiración



Otros flujos de interés

- Emisiones
 - Otros gases de efecto invernadero
 - Metano (CH_4)
 - Óxido nitroso (N_2O)
 - Partículas
 - Polvo
 - Compuestas volátiles orgánicas (VOC)
- Deposición
 - Gases dañinos
 - Ozono (O_3)
 - Amoníaco (NH_3)
 - Partículas
 - Nieblas (agua, nutrientes, contaminación)

Ya