

Este trabajo tiene licencia bajo CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Para materiales traducidos, le sugerimos dar crédito al autor(es) original y a (los) traductor(es).



# Principios de las mediciones de flujo de covarianza de Foucault

Flux Course, Colorado 2023



Dennis Baldocchi

Universidad de California, Berkeley

# Temas

- Conceptos básicos y descripción general de la covarianza de Foucault
- Aplicación en el mundo real
  - Cómo romper o doblar las reglas



# Referencias personales sobre la covarianza de "Eddy"

Global Change Biology (2003) 9, 479–492

REVIEW

## **Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future**

DENNIS D. BALDOCCHI

*Ecosystem Science Division, Department of Environmental Science, Policy and Management, 151 Hilgard Hall, University of California, Berkeley, Berkeley, CA 94720-3110, USA*

October 1988

SPECIAL FEATURE—GAS EXCHANGE 1331

---

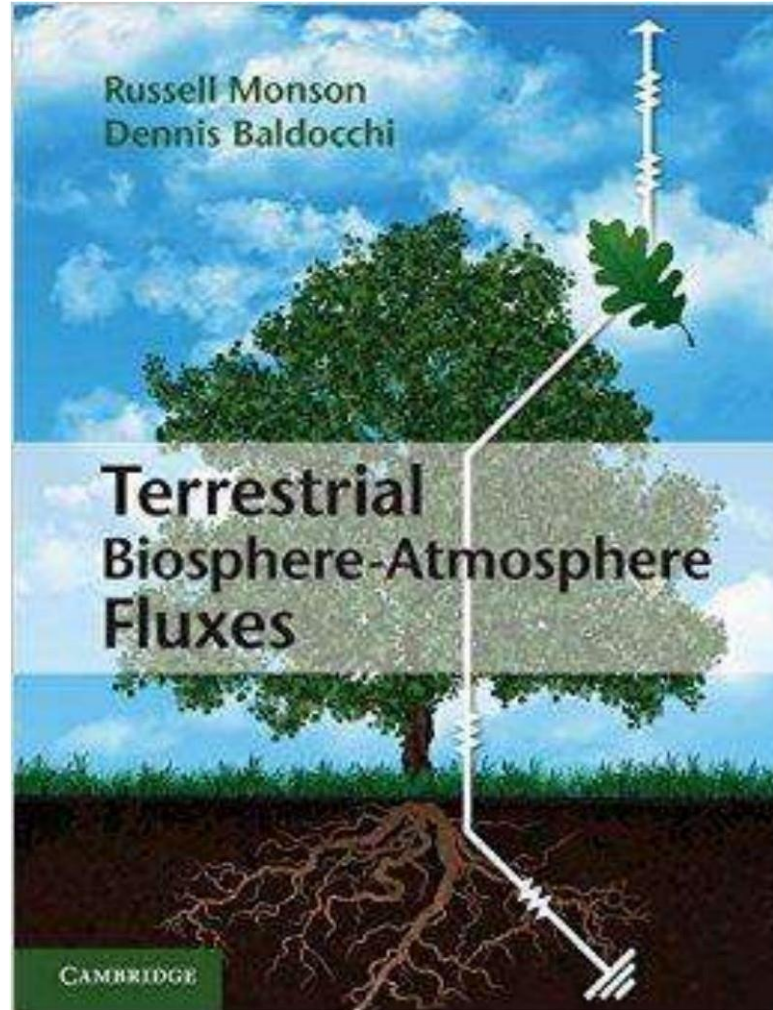
*Ecology*, 69(5), 1988, pp. 1331–1340  
© 1988 by the Ecological Society of America

## MEASURING BIOSPHERE–ATMOSPHERE EXCHANGES OF BIOLOGICALLY RELATED GASES WITH MICROMETEOROLOGICAL METHODS

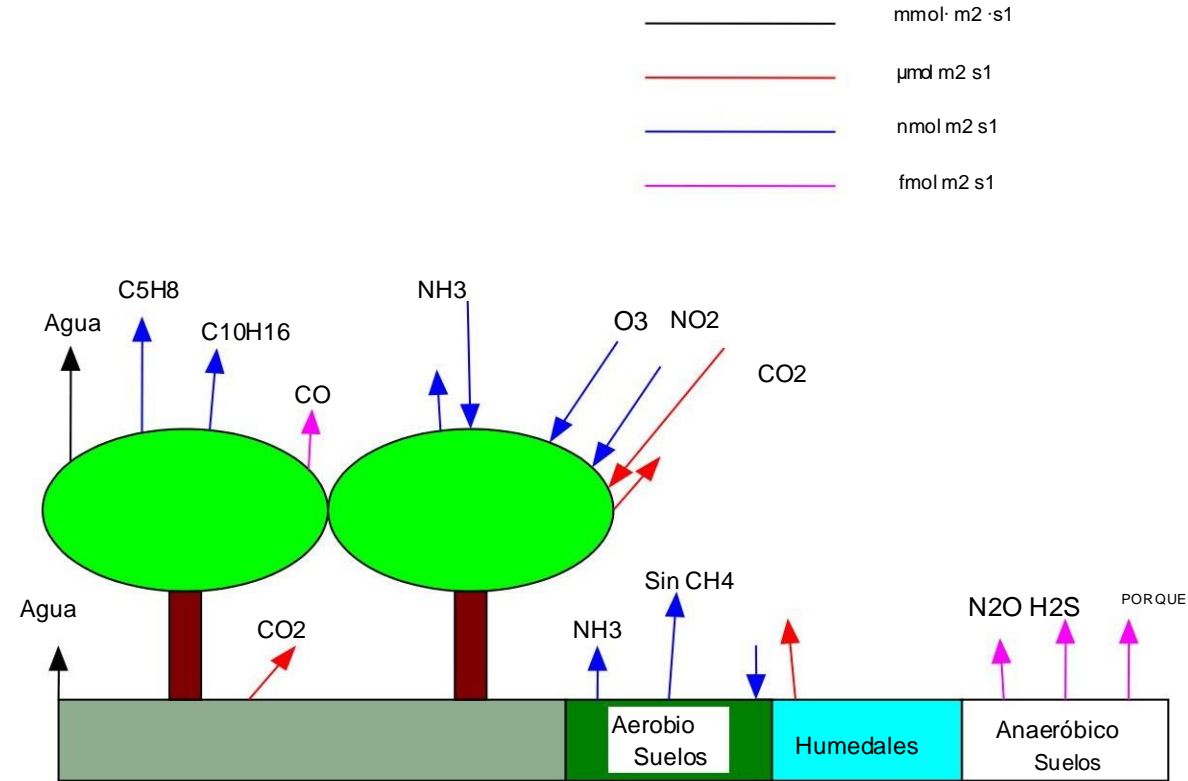
DENNIS D. BALDOCCHI, BRUCE B. HICKS, AND TILDEN P. MEYERS

*Atmospheric Turbulence and Diffusion Division,  
National Oceanic and Atmospheric Administration,  
P.O. Box 2456, Oak Ridge, Tennessee 37831 USA*

'El gran libro sobre el flujo'



# ¿Qué son y por qué se miden los flujos?: Lo que respira la biosfera



Los flujos, moles por metro cuadrado por segundo, son el tipo de 'moneda' con la que estudiamos el estado de la atmósfera y el metabolismo de los ecosistemas.

# Atributos de la covarianza de 'Eddy'

- Medición de flujo directo
- En sitio
- No hay interferencia en el sistema bajo investigación
- Medición representativa de una gran población de individuos
- Automático, no depende de mediciones manuales, como las cámaras

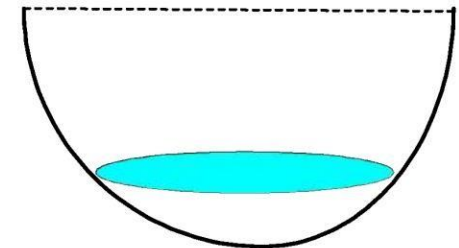
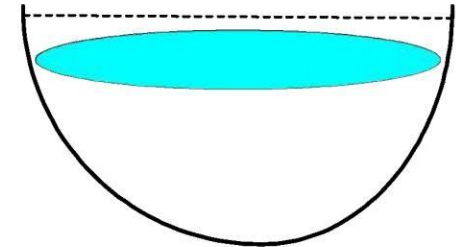
# ¿Qué son los flujos y por qué medirlos?

Considere una bañera:

El cambio de altura del agua en un volumen es proporcional a la diferencia entre el flujo de entrada menos el flujo de salida

Densidad de flujo (F) ~ masa/energía por unidad de área por unidad de tiempo

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{\partial F_i}{\partial x_i}$$





## Desafíos en la medición de los flujos de gases de efecto invernadero

- Medición/interpretación del flujo de gases de efecto invernadero de manera casi continua durante días, años y décadas
- Medición/interpretación de flujos sobre fuentes irregulares (por ejemplo, CH<sub>4</sub> , N<sub>2</sub>O)
- Medición/interpretación de flujos de fuentes temporalmente intermitentes (CH<sub>4</sub> , N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> , C<sub>5</sub>H<sub>8</sub> , HNO<sub>3</sub> , SO<sub>2</sub> , NO<sub>x</sub> )
- Medición/interpretación de flujos sobre terrenos complejos
- Medición de flujos de gases de efecto invernadero en áreas remotas sin línea de energía tipo AC
- Desarrollo de nuevos sensores para la aplicación rutinaria de la covarianza de Foucault, o Teoría micrometeorológica para mediciones de flujo de gases traza y sus isótopos (CH<sub>4</sub> ,N<sub>2</sub>O, <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> , C<sup>18</sup>O<sub>2</sub> )

Objetivo: Desconstruir el 'presupuesto' de conservación

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{\partial F_i}{\partial x_i} =$$
$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = - \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z}$$

u, velocidad longitudinal

v, velocidad lateral

w, velocidad vertical

C, relación de mezcla escalar

I: Tasa de cambio temporal

II: Advección

III: Divergencia de flujo



## Capa de flujo constante

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} = 0$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} dz = C = Flux = \overline{w'c'}$$

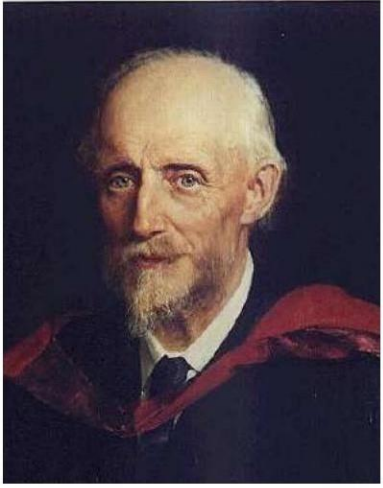
Estado estable ( $dc/dt = 0$ ); alcance infinito y sin convección ( $dc/dx = dc/dy = 0$ ); velocidad vertical media,  $w, = 0$

Covarianza de Eddy,  
Densidad de flujo: mol m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> o J m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

$$F = \overline{\rho_a w s} \sim \overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

$$s = \left( \frac{\rho_c}{\rho_a} \right)$$

w es la velocidad vertical; s es la concentración específica;  
los primos son fluctuaciones de la media; la barra superior denota el promedio de tiempo



## Reglas de promedio de Reynolds

1) el producto medio (de barra superior) de dos variables fluctuantes (primas, ') es una función del producto de las medias individuales más una covarianza,

$$\overline{xy} = \overline{x} \overline{y} + \overline{x'y'}$$

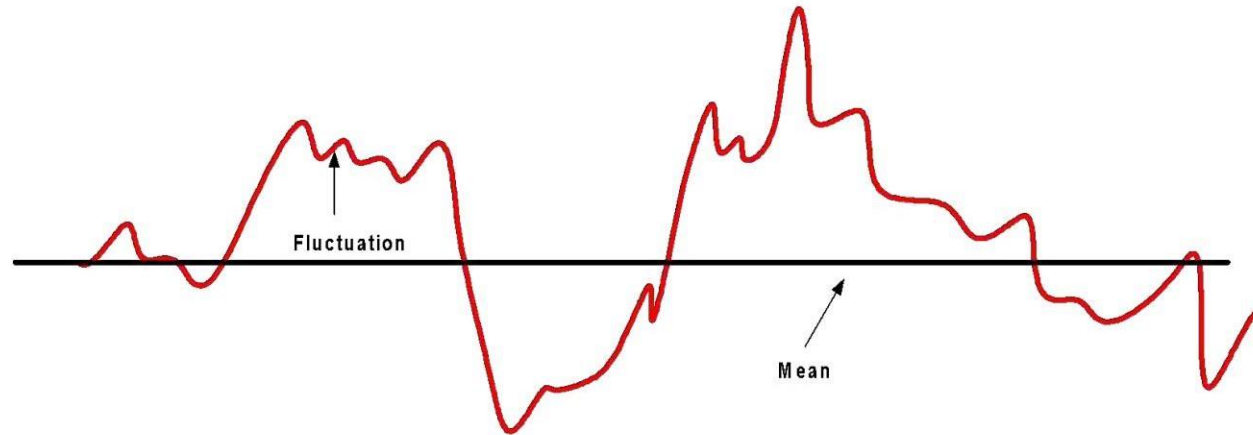
2) el promedio de cualquier componente fluctuante es cero,

$$\overline{x'} = 0$$

3) el promedio de la suma de dos componentes es aditivo

$$\overline{x + y} = \overline{x} + \overline{y}$$

## Deducción de medias y fluctuaciones a partir de la media



$$x' = x - \bar{x}$$

## Operación algebraica del flujo con descomposición de Reynolds

$$\overline{\rho_a w s} = \overline{(\overline{w} + w')(\overline{s} + s')(\overline{\rho_a} + \rho_a')}$$

8 Términos del promedio de Reynolds

$$\overline{(\bar{w} + w')(s + s')(\rho_a + \rho_a')}$$

,

$$\overline{\rho_a \cdot s \cdot w'}$$

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{s}$$

,

$$\overline{\rho_a \cdot w \cdot s'}$$

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w'} \cdot \overline{s'}$$

,

$$\overline{w' \cdot s' \cdot \rho_a'}$$

$$\overline{w} \cdot \overline{s'} \cdot \overline{\rho_a'}$$

,

$$\overline{s \cdot w \cdot \rho_a'}$$

$$\overline{s} \cdot \overline{w'} \cdot \overline{\rho_a'}$$



**Términos que tienden a cero,  
ya que los promedios de fluctuaciones son iguales a cero por definición**

$$\overline{\overline{\rho_a \cdot w \cdot s'}}$$

$$\overline{\overline{\rho_a \cdot s \cdot w'}}$$

$$\overline{\overline{s \cdot w \cdot \rho_a'}}$$

Asumiendo que los momentos triples son despreciables

$$\overline{w' \cdot s' \rho_a'}$$

Restos

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

$$\overline{\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}}$$

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{s}$$

$$\overline{\overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}}$$

## Términos restantes

Covarianza de flujo

$$\overline{\rho_a \cdot w' s'}$$

Flujo de aire seco

$$\overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Flujo vertical medio

$$\overline{\rho_a \cdot w \cdot s}$$

Producto triple

$$\overline{w' \cdot s' \cdot \rho_a'}$$

$$\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}$$

## Evaluación de la velocidad de deriva vertical, w

La densidad de flujo del aire seco es cero;

La densidad de flujo del aire húmedo es la evaporación.

$$\overline{w\rho_a} = \overline{w'\rho_a'} + \overline{w\rho_a} = 0$$

$$\overline{w} = -\overline{w'\rho_a'} / \overline{\rho_a}$$

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{S}$$

Cancela

$$\overline{S \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Sustitución de

$$\bar{w} = \overline{-w' \rho_a'} / \overline{\rho_a}$$

en

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{s}$$

Rendimientos

$$\overline{-s \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Y cancela

$$\overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Los residuos incluyen términos de covarianza.

$$\overline{\rho_a \cdot w' s'} \qquad \overline{\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}}$$

Sustitución de  $\overline{w} = \overline{-w' \rho_a' / \rho_a}$  en  $\overline{\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}}$

$$\overline{-w' \rho_a' \cdot s' \cdot \rho_a'}$$

Momento de cuarto orden ~0

## Definición formal de covarianza de remolinos, V1

$$F = \overline{\rho_a w s} \approx \overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

Aplicable en condiciones de estado estable, homogeneidad horizontal, alcance extendido y dentro de la capa límite de la superficie.

## Pasos en el procesamiento de datos

- Rotar las coordenadas de los vectores del viento (x, y, z: u, v, w)
- Eliminar la tendencia de las series temporales y calcular fluctuaciones y covarianzas
- Aplicar correcciones espectrales
- Aplicar "correcciones" de fluctuación de densidad
- Cumplir con las convenciones de nombres de unidades variables
- Probar la estacionariedad
- Rechazar o marcar los datos "???"
- Aplicar métodos de relleno de huecos para las integrales diarias y anuales



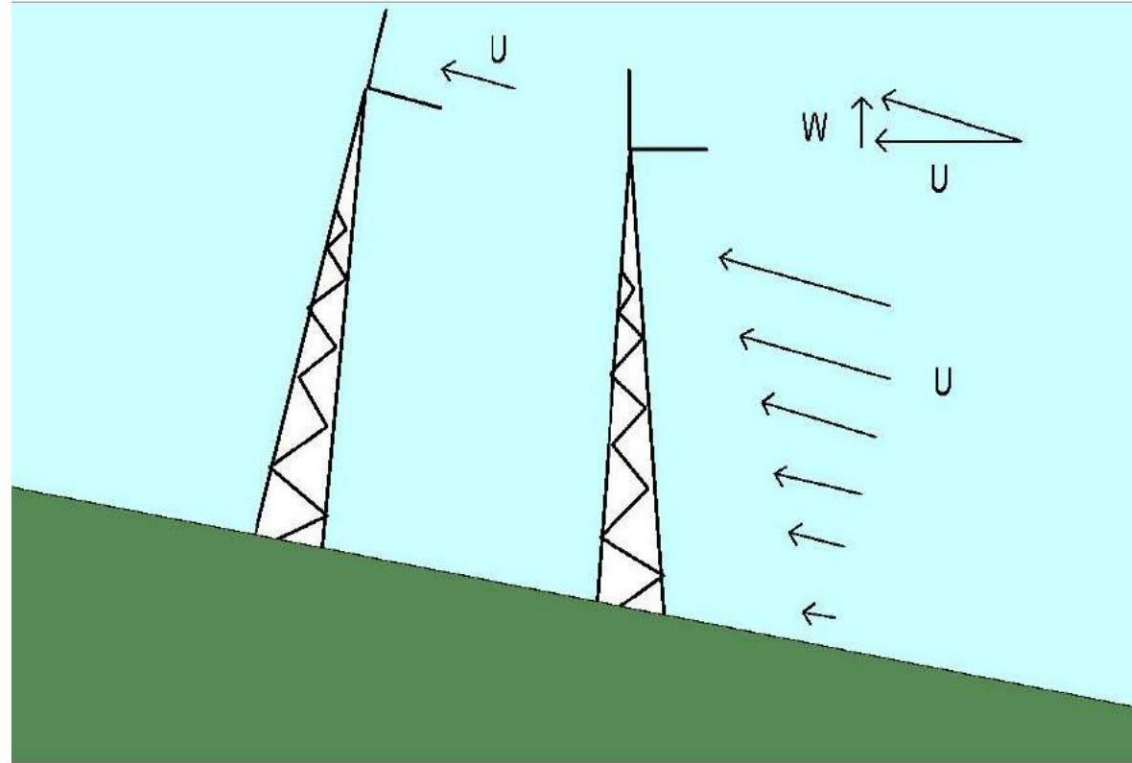
1<sup>o</sup> Mandamiento de la covarianza de Eddy:  
“Conoce tu sitio”  
...y “Conozca sus sensores”



Rayo Leuning

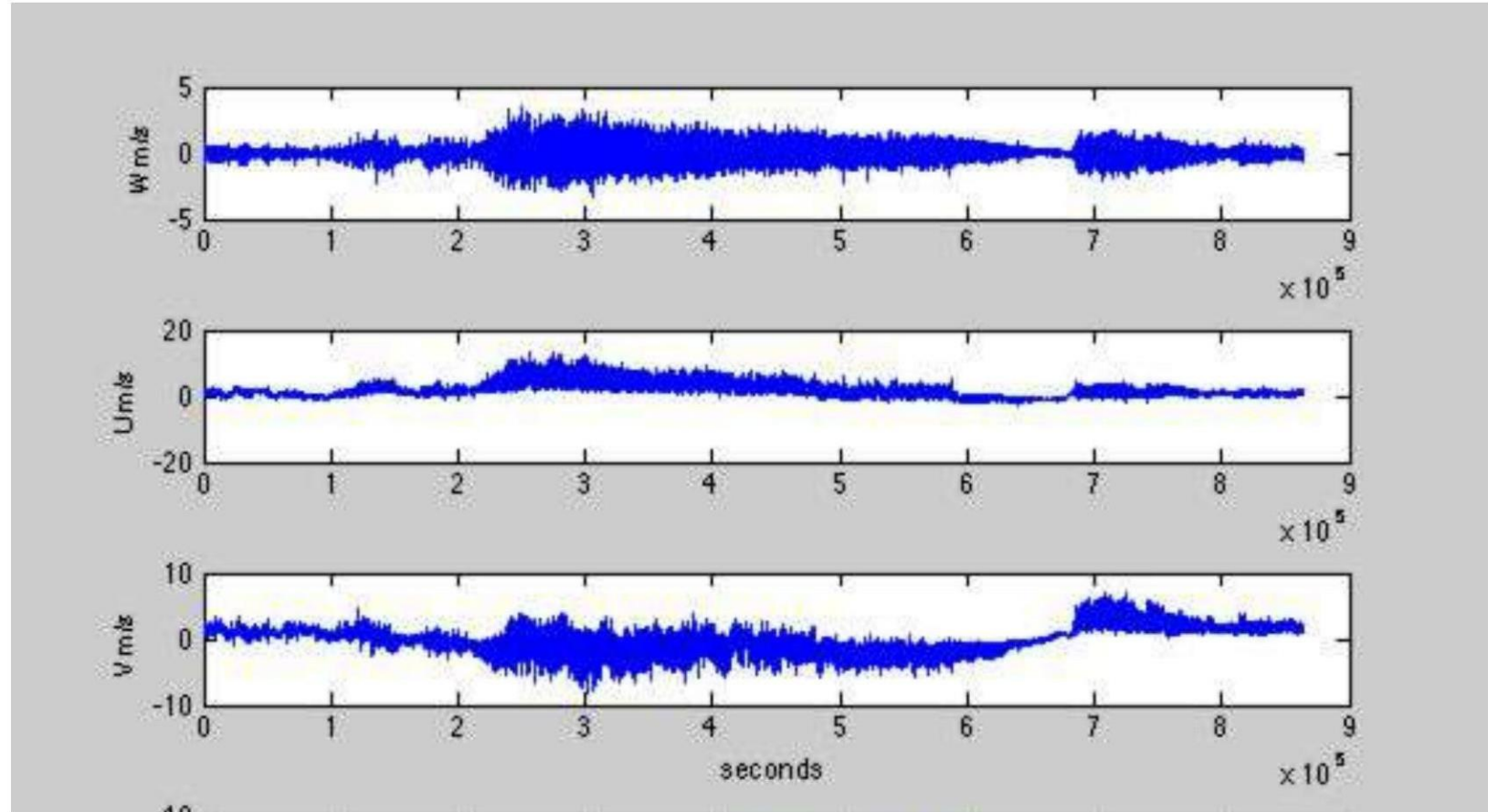
# Flujos sobre terrenos inclinados y complejos

## Rotación de coordenadas 3D



$W$  es la velocidad vertical media,  
Ortogonal a las líneas de corriente media

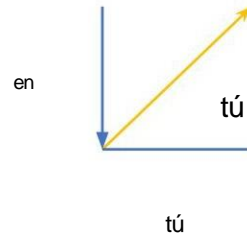
La velocidad vertical se deriva de la rotación del sonido 3D



# Trigonometría de rotación de coordenadas

$$\overline{w'c'} = \overline{W'C'}_{raw} \cdot \cos \theta - \overline{U'C'}_{raw} \cdot \sin \theta \cdot \cos \varepsilon - \overline{V'C'}_{raw} \cdot \sin \theta \cdot \sin \varepsilon$$

Primera rotación, plano XY

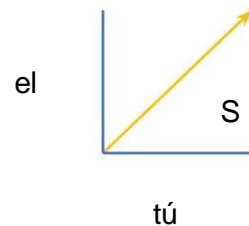


$$U = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$\cos \varepsilon = \frac{u}{(u^2 + v^2)^{1/2}}$$

$$\sin \varepsilon = \frac{v}{(u^2 + v^2)^{1/2}}$$

Segunda rotación, plano XY vs Z



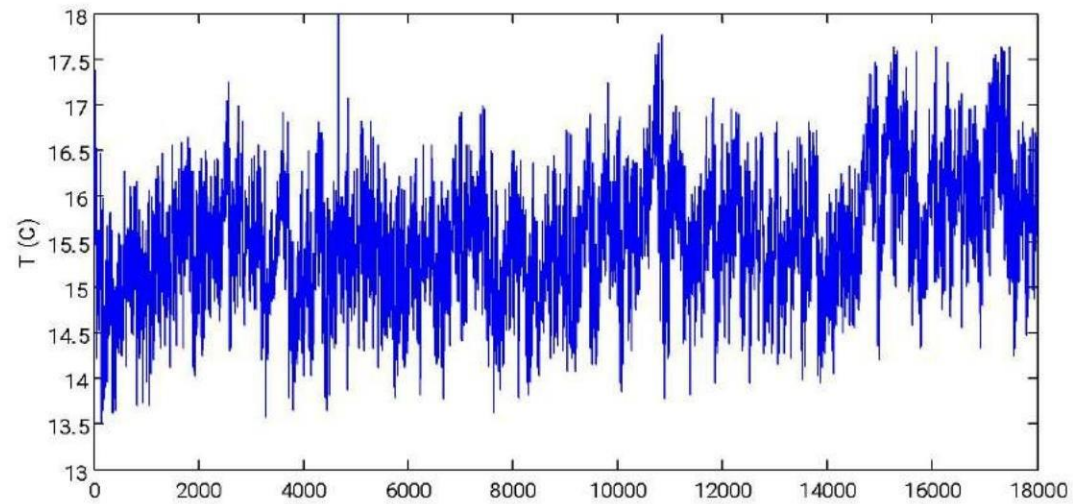
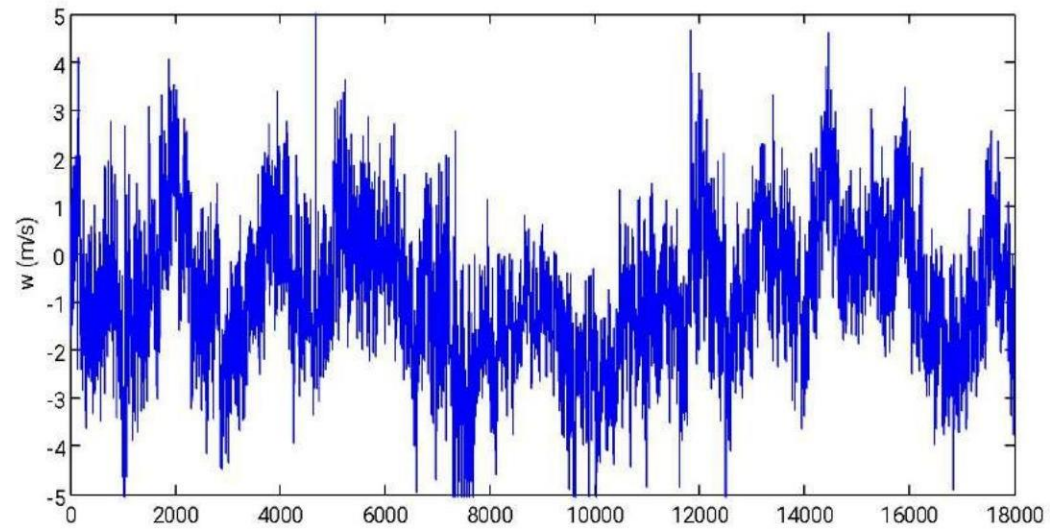
$$S = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$$

$$\cos \theta = \frac{U}{(u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}}$$

$$\sin \theta = \frac{w}{(u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}}$$



Marv Wesely  
19442003



La covarianza de 'Eddy' nos obliga  
a  
muestrear lo suficientemente  
rápido y suficientemente largo

30 minutos a 10 Hz

El espectro de potencia/coespectro define las frecuencias que se muestrearán para medir la varianza y la covarianza.

Espectro de potencia

$$\overline{w' w'} = \int_0^{\infty} S_{ww}(\omega) d\omega$$

Coespectro

$$F = \overline{w' c'} = \int_0^{\infty} S_{wc}(\omega) d\omega$$

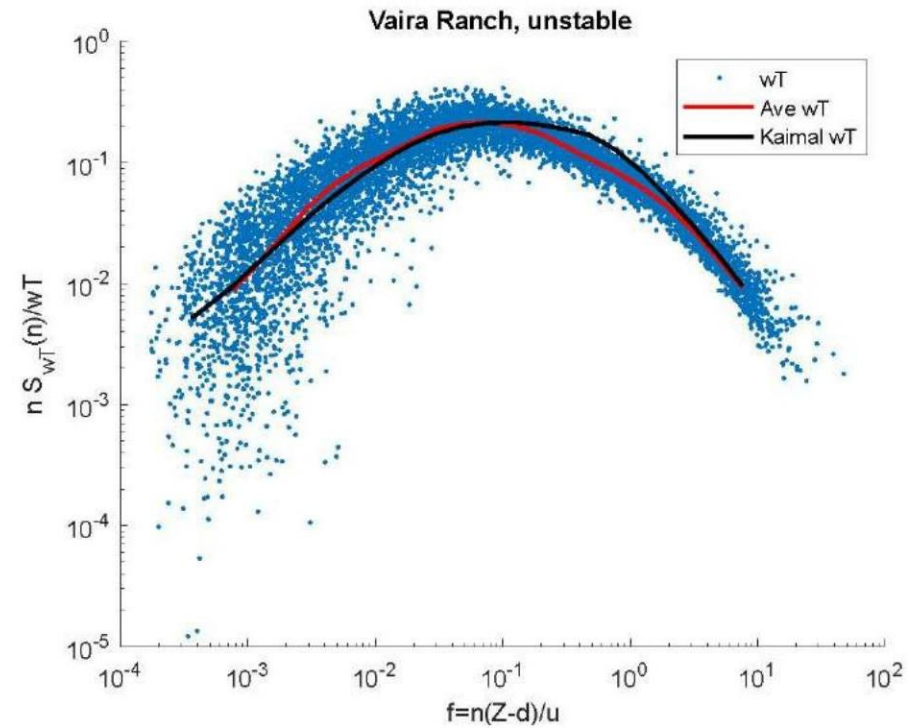


Transformada de Fourier

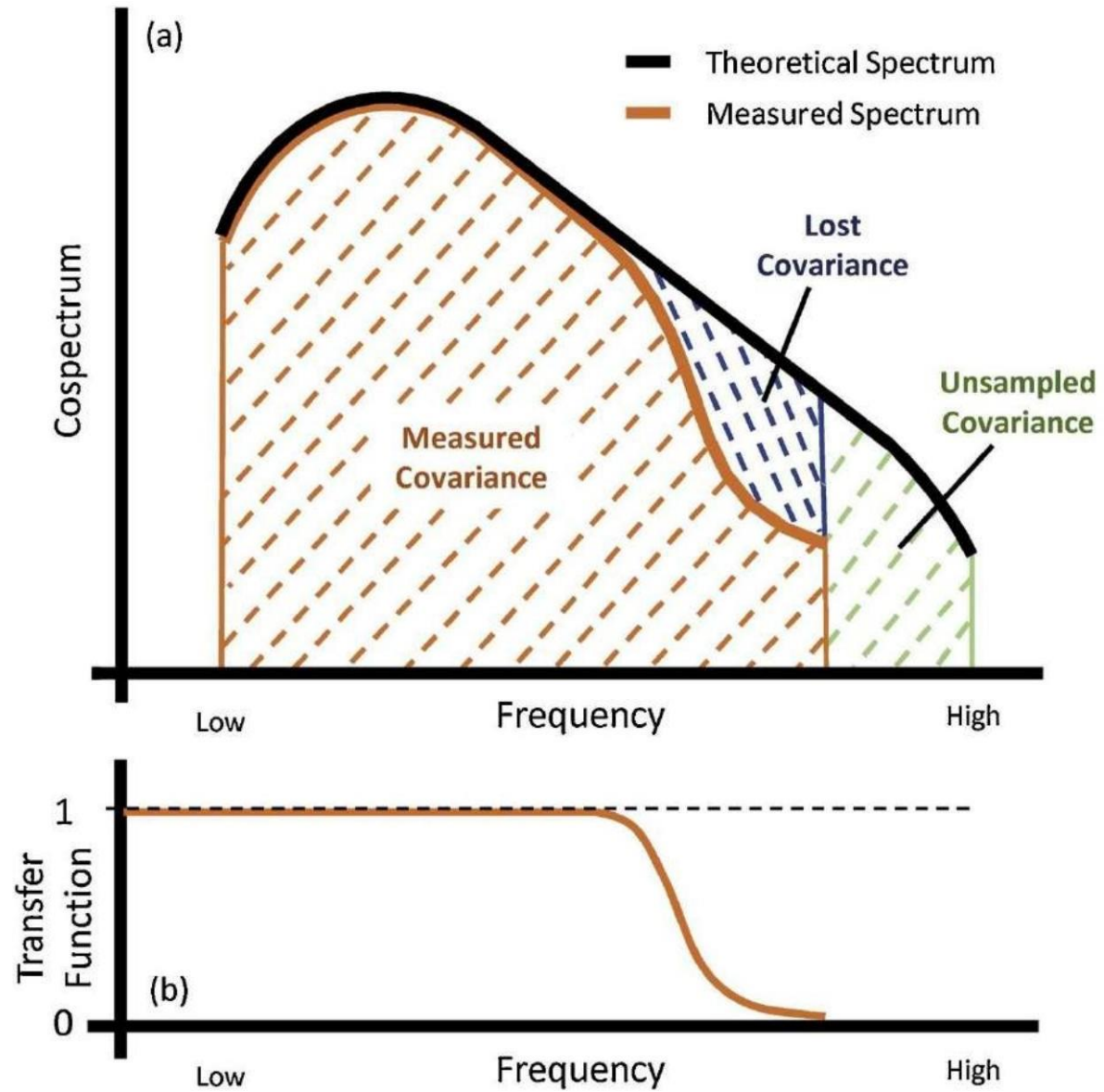


¿Cuánto tiempo se tarda en muestrear? ¿Qué tan rápido se puede muestrear?

Debe tomar muestras de Eddies hasta 20 veces por segundo durante 30 a 60 minutos



Potencia y coespectros de series temporales:  
Transformadas de Fourier o Wavelet





Aplicar funciones de transferencia para corregir flujos

$$\overline{w'c'_{measured}} = \int_0^{\infty} H(\omega) Co_{wc}(\omega) d\omega$$

Funciones de filtrado

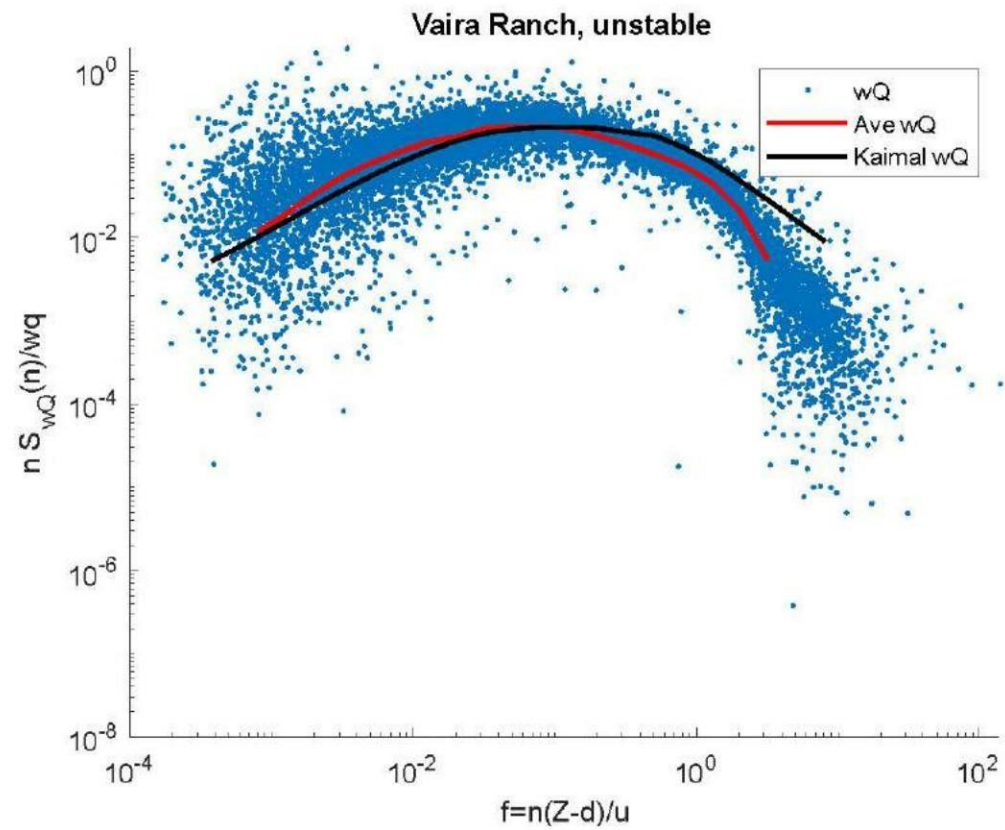
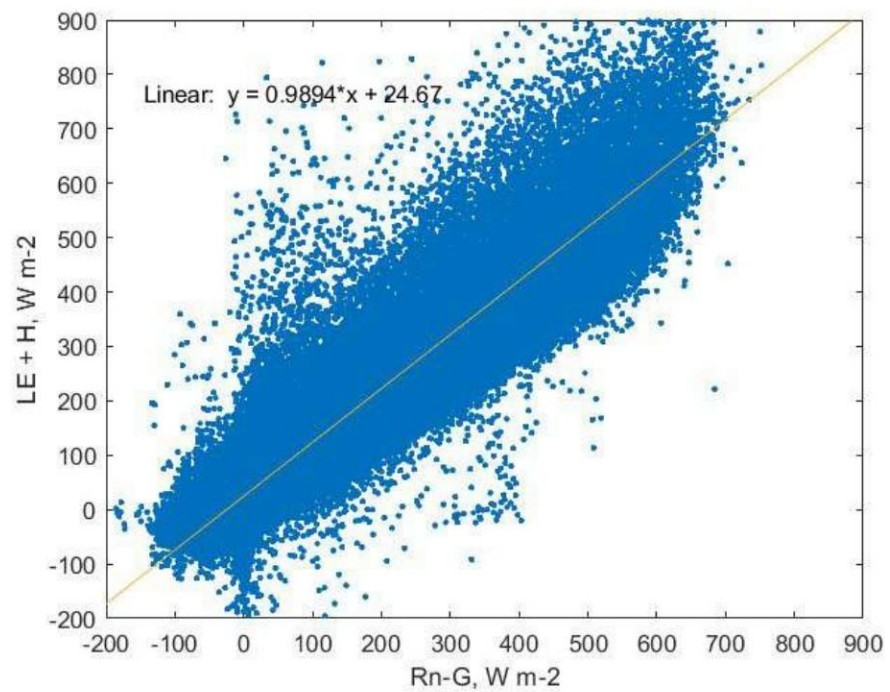
$$H(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega)\dots H_n(\omega) = \prod_{n=1}^N H_n(\omega)$$

Moore, 1986 BLM

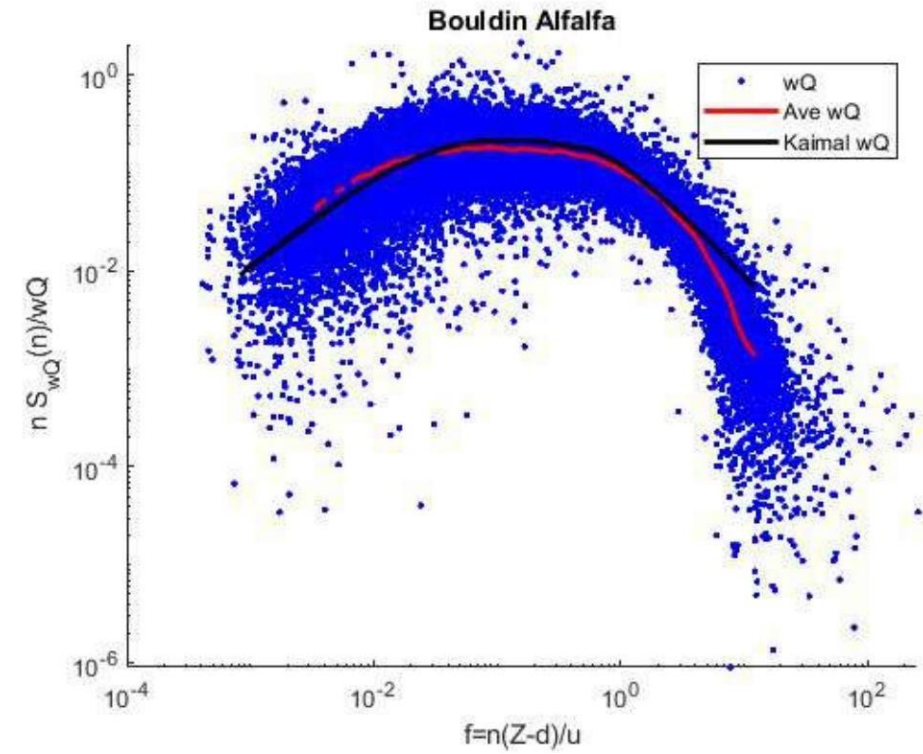
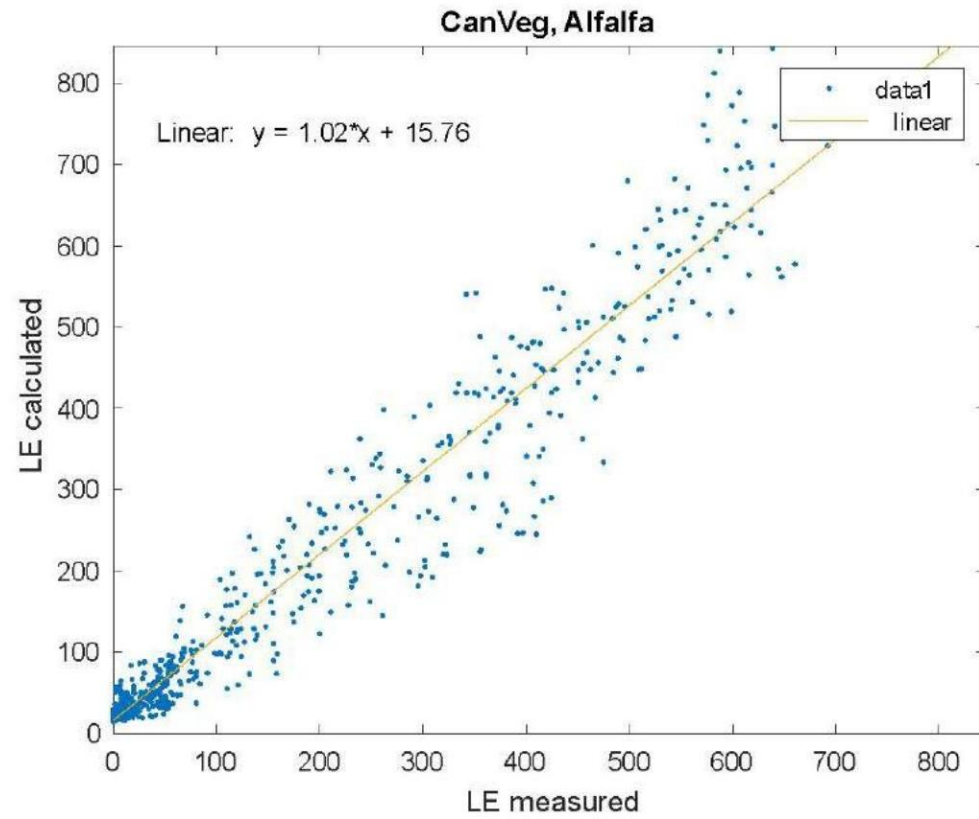
## Atenuación de señal:

### El papel de las funciones de filtrado

- Tiempo de respuesta del sensor
- Atenuación de la señal del sensor
  - Longitud de la tubería y caudal volumétrico
  - Promedio de línea o volumen del sensor
- Separación de sensores
  - Tiempos de retraso y adelanto entre w y c
- Filtrado de paso alto y paso bajo mediante eliminación de media
  - Frecuencia de muestreo (110 Hz) y duración promedio (3060 min)
- Muestreo digital y aliasing

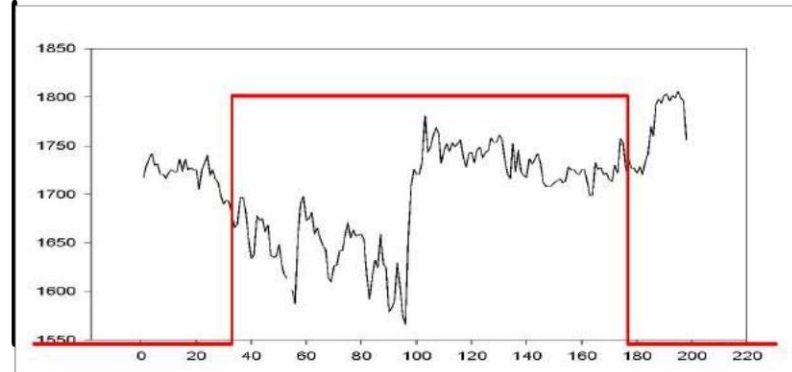


Función de transferencia, 0,76



## Filtrado por promedio de bloque

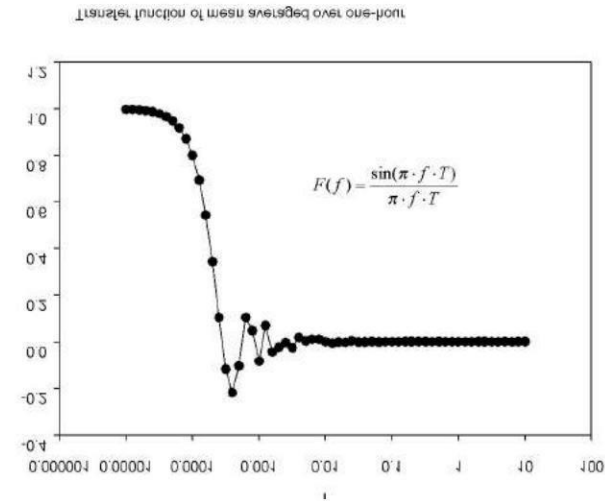
$$h(t) = 0, \\ -\frac{T}{2} < t > \frac{T}{2}$$



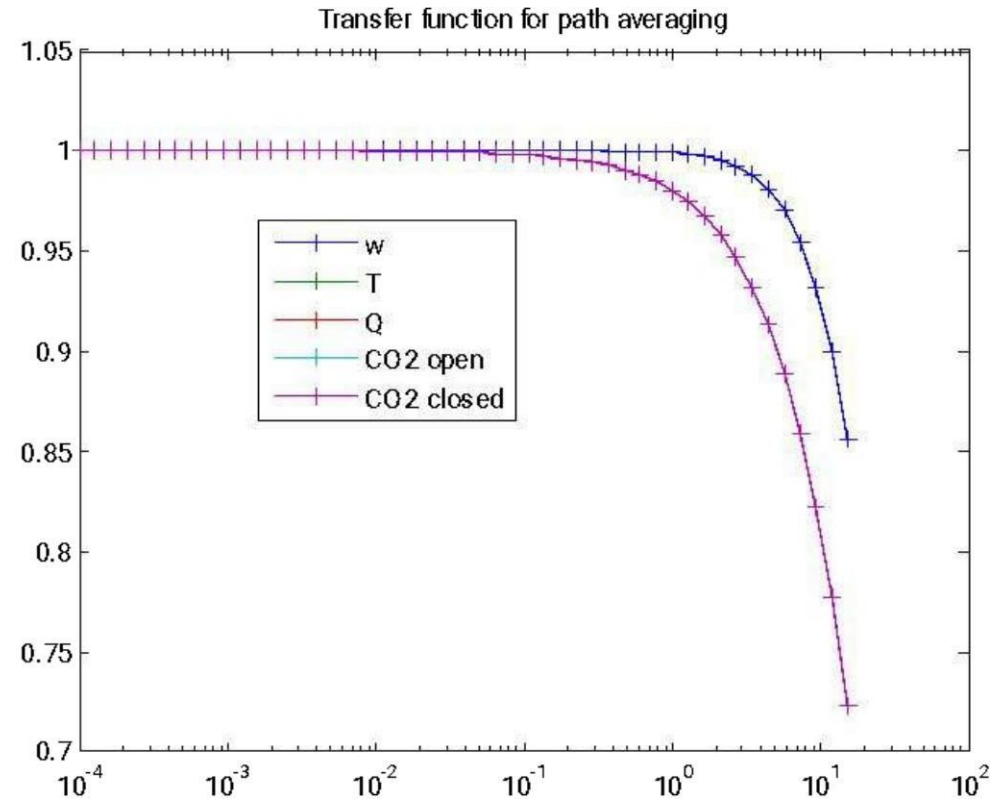
$$h(t) = 1, \\ -\frac{T}{2} > t < \frac{T}{2}$$

La transformada de Fourier de un promedio de bloque produce un filtro de paso bajo sinusoidal

$$F(f) = \frac{\sin(\pi \cdot f \cdot T)}{\pi \cdot f \cdot T}$$



## Función de transferencia para promediar la trayectoria

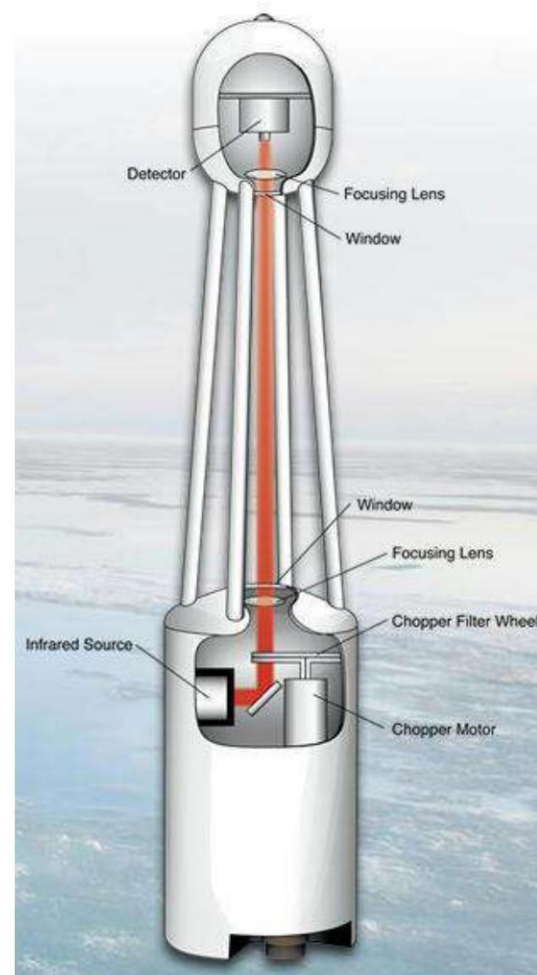


## Definición formal de covarianza de remolinos, V2

$$F = \overline{\rho_a w s} \approx \overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'} = \overline{w \rho_c} = \overline{w' \rho_c'} + \overline{w \rho_c}$$

Muchos sensores miden la densidad molar, no la relación de mezcla; por ejemplo, los espectrómetros infrarrojos que deducen la densidad molar a partir de la transmisión de luz a través de una trayectoria óptica.

## Analizador de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O de trayectoria abierta popular para covarianza de Foucault





Pero los sensores no miden la relación de mezcla, miden la densidad molar.

$$F = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho_c'} + \overline{w\rho_c}$$

$$\overline{w} = -\overline{w'\rho_a'} / \overline{\rho_a}$$

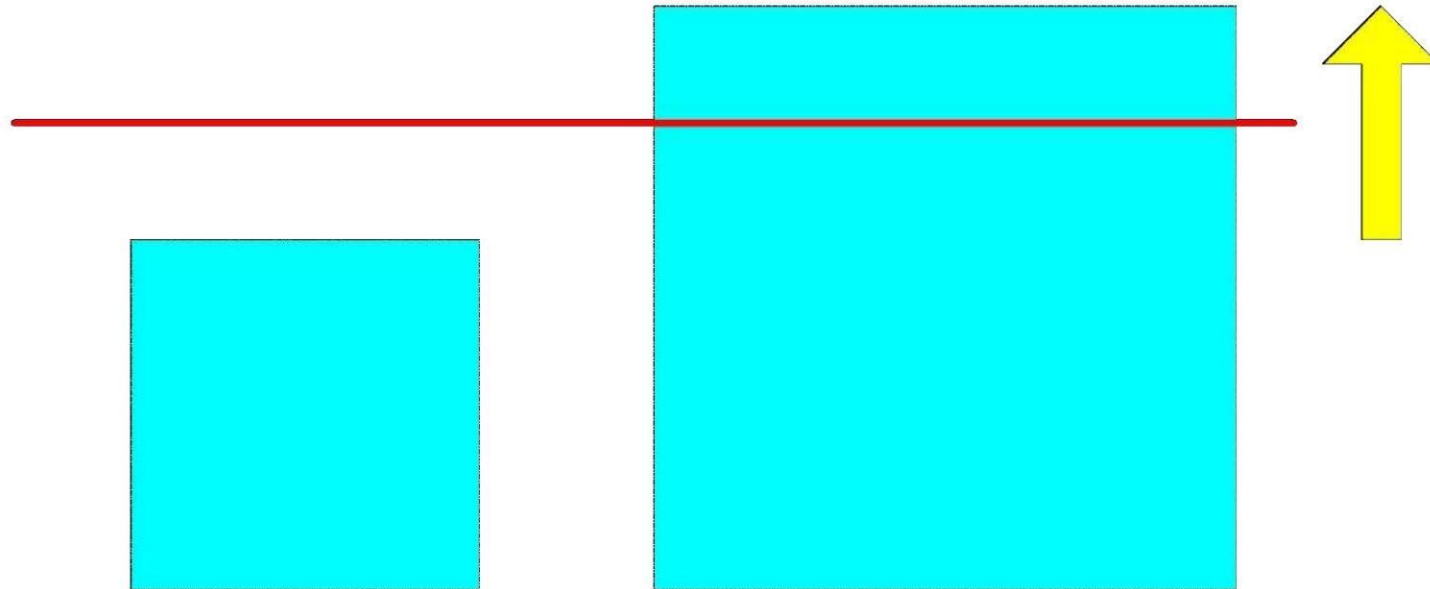
1<sup>o</sup> supuesto de orden, aproximación de Boussinesq

$$\frac{\rho_a'}{\rho_a} = -\frac{T'}{T}$$

$$F = \overline{w'\rho_c'} + \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w'T'}$$

La densidad molar cambiará si hay más moléculas  
Se empaquetan en un volumen o si el volumen se expande  
O se contrae por temperatura y humedad

$$dV/A = dz; w = dz/dt$$



'corrección' para el aire húmedo

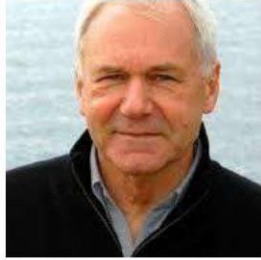
$$\frac{\rho}{m} = \frac{\rho_a}{m_a} + \frac{\rho_v}{m_v} = \frac{p}{RT}$$

$$\frac{\rho_a'}{m_a} + \frac{\rho_v'}{m_v} = -\frac{p}{RT} \frac{T'}{T} + \dots$$

Expansión de la serie Taylor

$$\rho_a' = -\frac{m_a}{m_v} \rho_v' - \overline{\rho_a} \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\overline{\rho_a m_v}}\right) \frac{T'}{T}$$

$$\overline{w} = -\overline{w' \rho_a'} / \overline{\rho_a} = \frac{m_a}{m_v} \frac{\overline{w' \rho_v'}}{\overline{\rho_a}} + \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\overline{\rho_a m_v}}\right) \frac{\overline{w' T'}}{T}$$



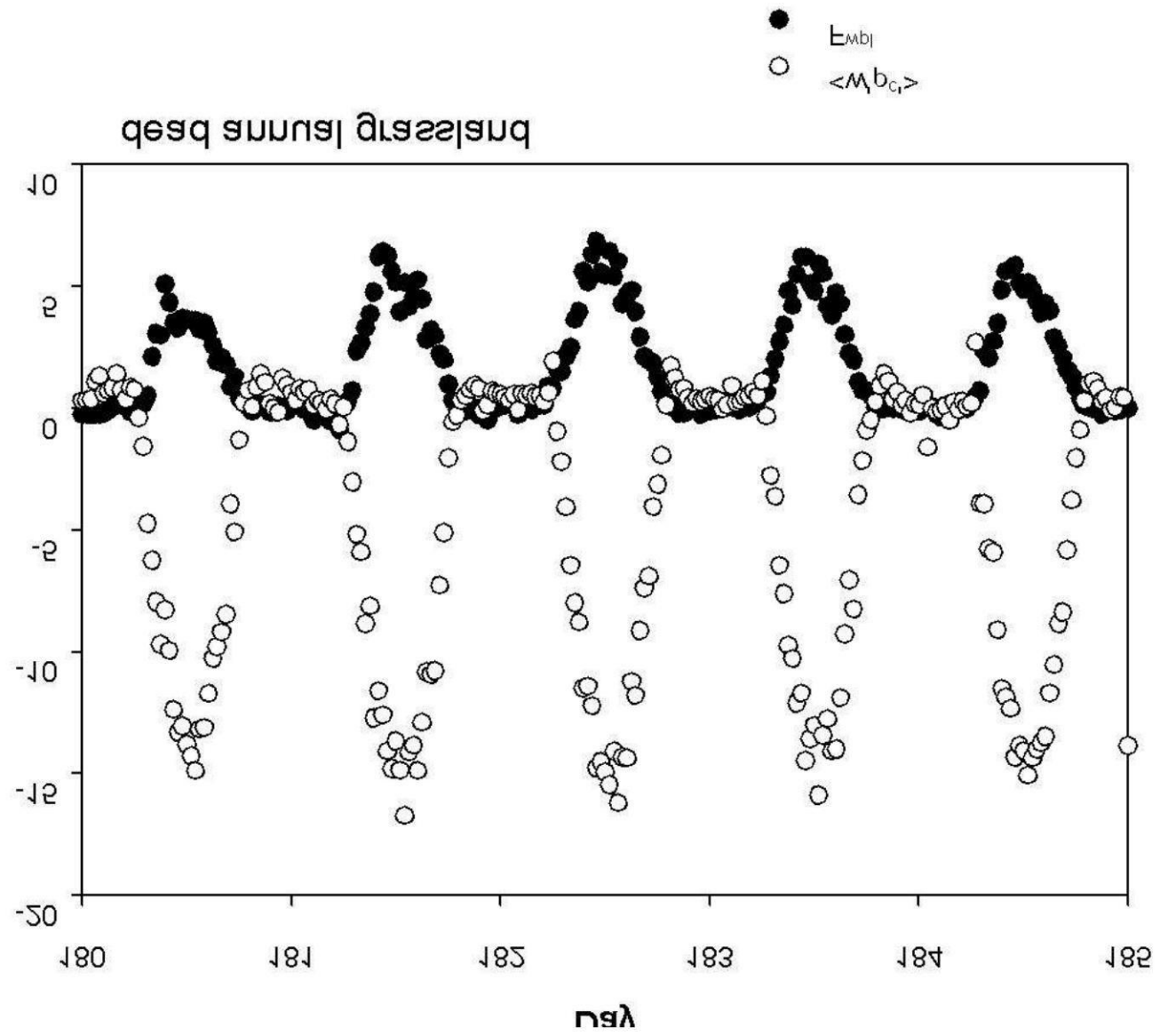
Webb, Pearman, Algoritmo de Leuning:  
'Corrección' de las fluctuaciones de densidad al utilizar  
sensores de trayectoria abierta



$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \frac{m_a}{m_v} \frac{\overline{\rho_c}}{\rho_a} \overline{w' \rho_v'} + \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\rho_a m_v}\right) \frac{\overline{\rho_c}}{T} \overline{w' T'}$$



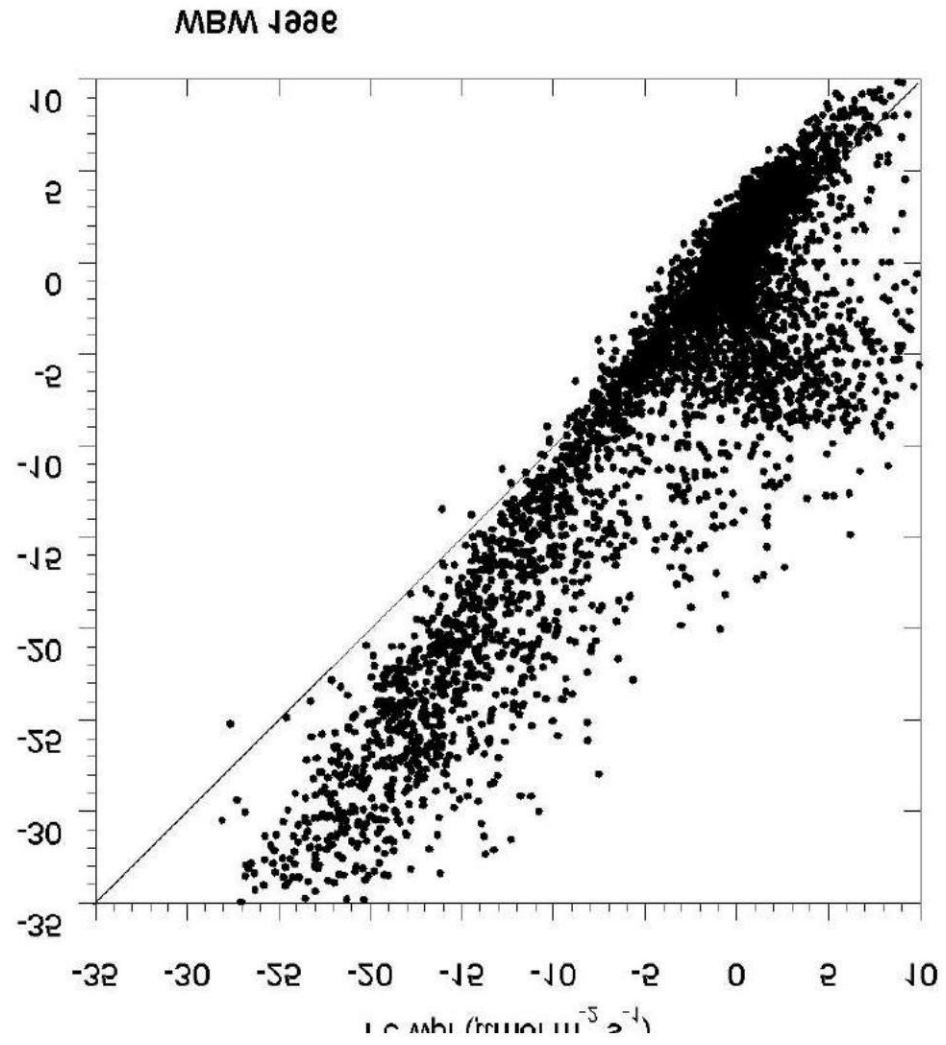
Nota: medir las covarianzas de temperatura  
y vapor de agua con la velocidad  
vertical para “corregir” la covarianza del flujo de CO2 bruto  
cuando se utilizan sensores de trayectoria abierta.



dead annual grassland

La hierba muerta no  
Realizar la fotosíntesis

## Bosque templado, ambiente húmedo.

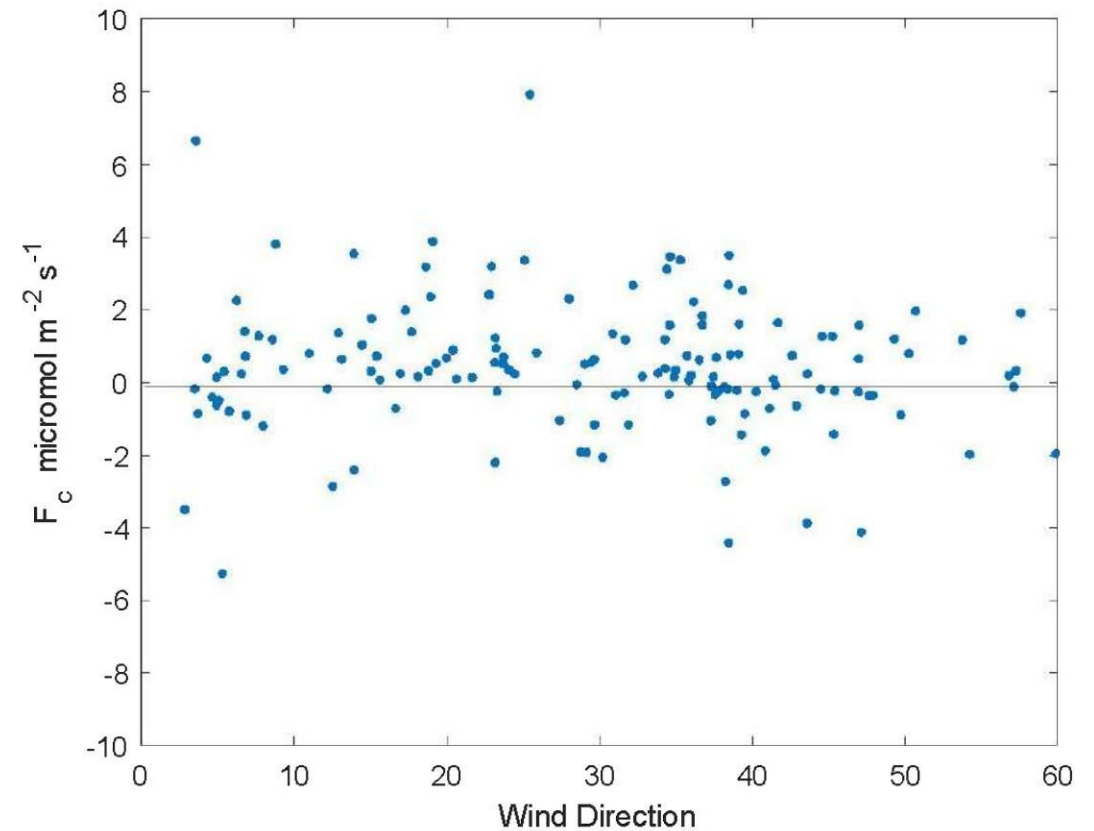


No se debe medir la fotosíntesis durante la noche cuando realmente se está produciendo la respiración.

# Prueba del WPL en Moffett Field, NASA Ames



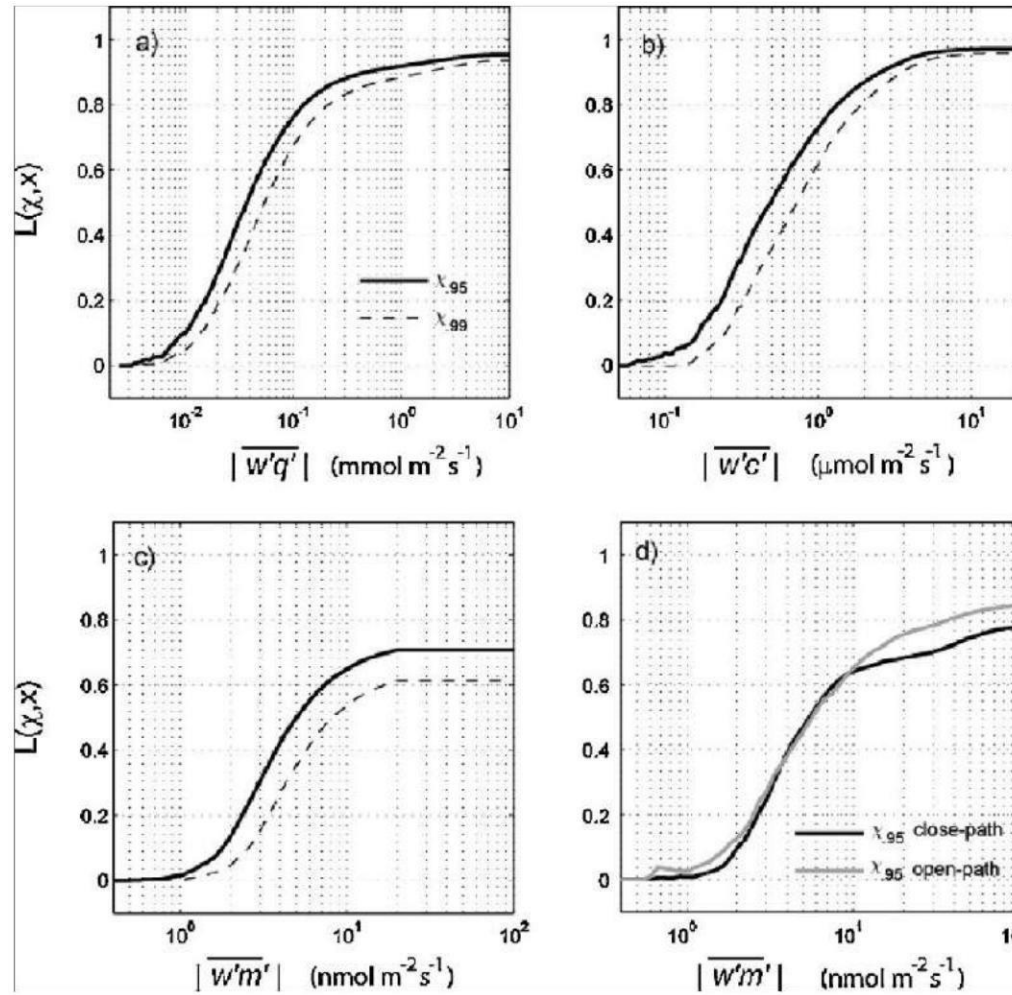
$F_c$  (viento dir 0|60) = 0,375 +/- 0,129 (se)



# Límite de detección de flujo

M. Detto et al. / Agricultural and Forest Meteorology 151 (2011) 1312–1324

$\langle w'q' \rangle$   
 $> 0,035 \text{ mmol m}^2 \text{ s}^{-1}$



$\langle w'c' \rangle$   
 $0,31 \mu\text{mol m}^2 \text{ s}^{-1}$

$\langle w'm' \rangle$   
 $3,85 \text{ nmol m}^2 \text{ s}^{-1}$



# Romper/doblar las reglas: Garantía y control de calidad



El mundo real no es Kansas, que es  
más plano que un panqueque

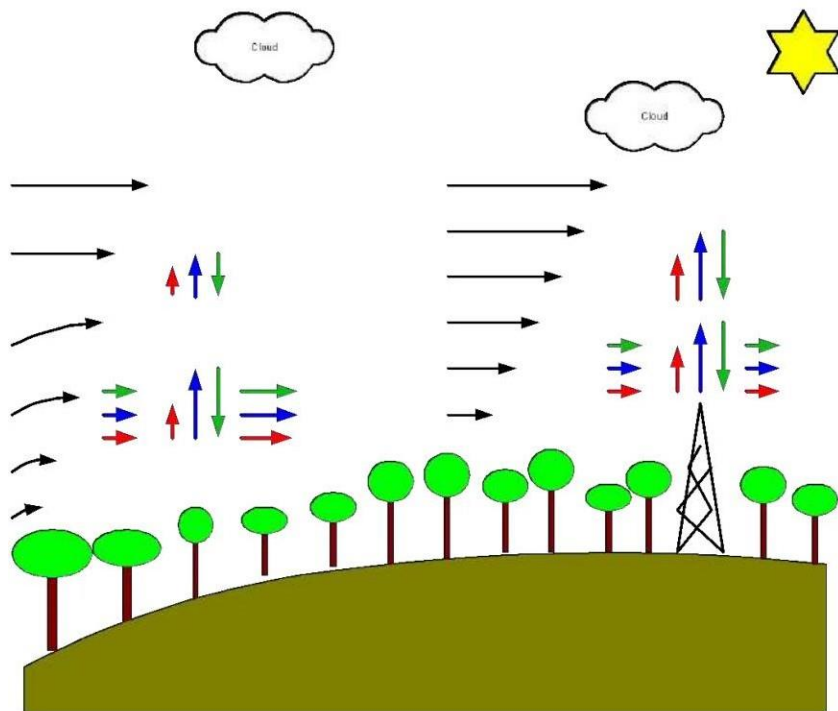
El mundo real no tiene una búsqueda infinita

El mundo real tiene un mosaico de fuentes y sumideros

El mundo real no tiene una turbulencia constante y bien mezclada



## Covarianza de Eddy en el mundo real



Capa de flujo constante

Asume

NO hay divergencia de flujo

La advección puede causar flujo

Divergencia

Drenaje y Desacoplamiento

Flujos

Humedales,

Que por Naturaleza son  
PLANOS, pero tienen fuentes  
heterogéneas.

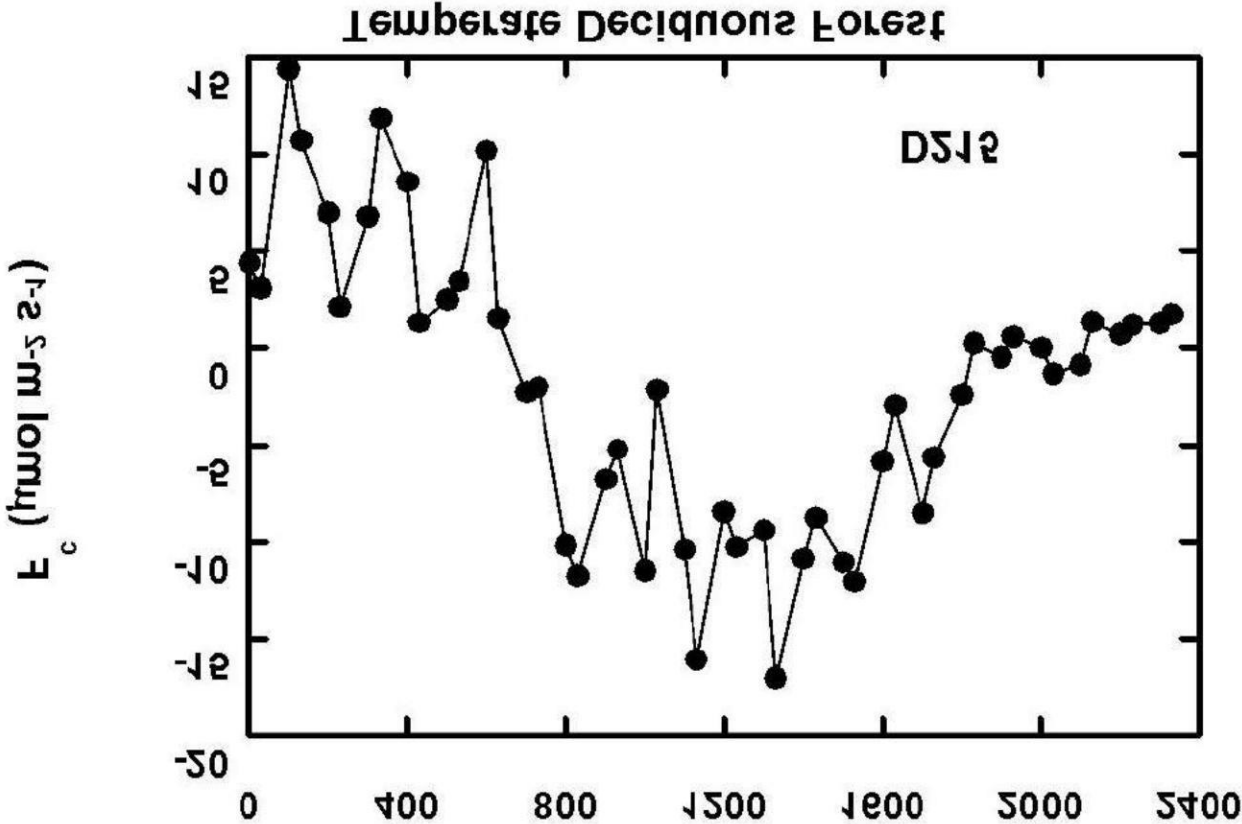
# Errores de sesgo sistemáticos y aleatorios

- Falta de sesgos espaciales/de búsqueda
- Cambio en el almacenamiento
- Divergencia de flujo/advección
- Corrección  $U^*$  por falta de mezcla turbulenta adecuada durante la noche
- Rendimiento inadecuado del sensor
  - Desviación de calibración (pendiente e intersección), picos/ruido, a/d fuera de rango
  - Filtrado y marcado de señales
- Cierre del balance de energía de prueba
- Errores de procesamiento de software
- Brechas y relleno de brechas





No todos los C Flux son lo que parecen:  
Oscilaciones nocturnas, flujos no biológicos

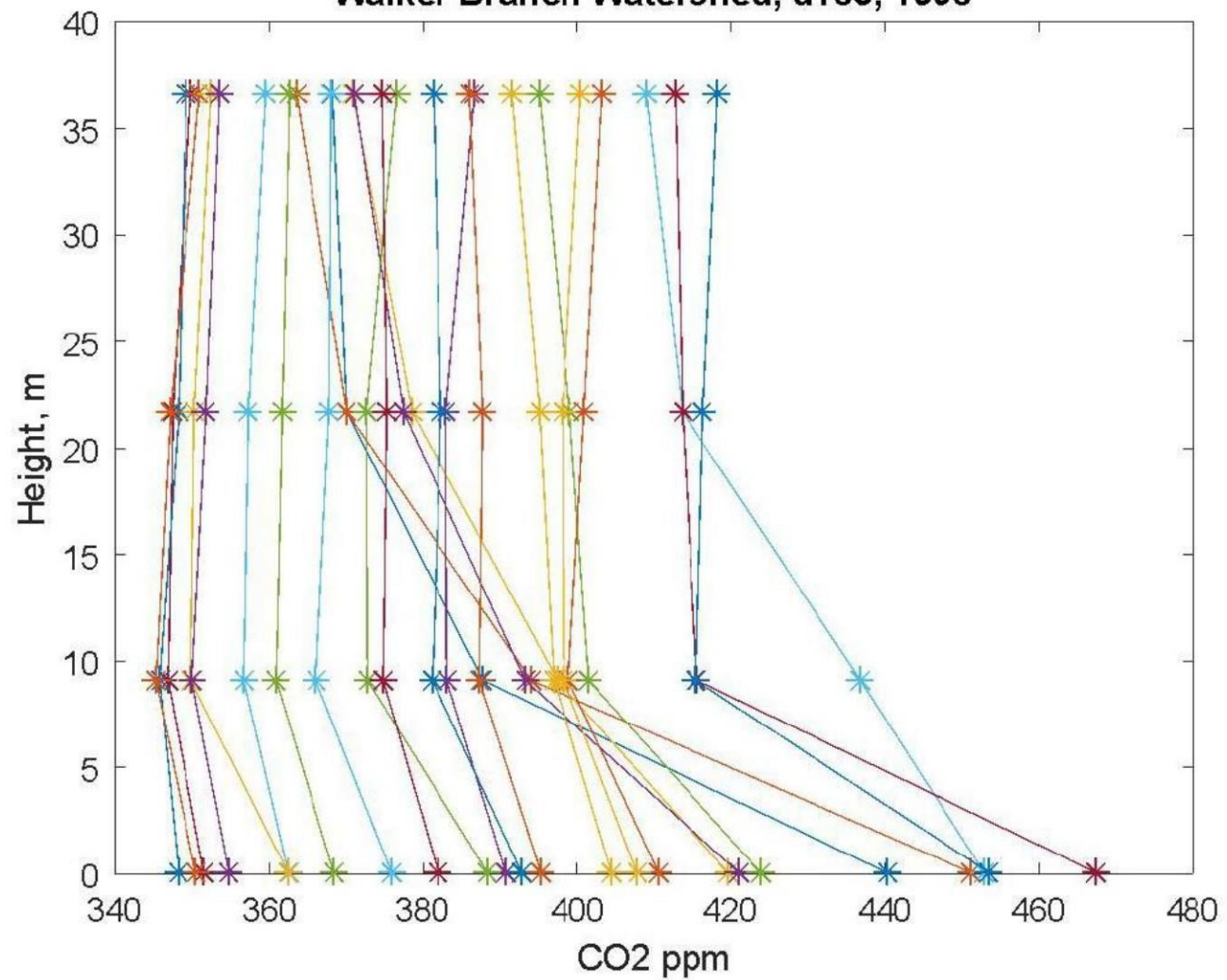


Almacenamiento en la capa de aire, como en la noche

$$\overline{\rho_a w' s'(h)} + \overline{\rho_a} \int_0^h \frac{\partial s}{\partial t} dz = \overline{\rho_a w' s'(0)} + \int_0^h S(z) dz$$

Requiere que midamos el cambio de C con el tiempo en el perfil desde el suelo hasta el sensor

Walker Branch Watershed, d185, 1998

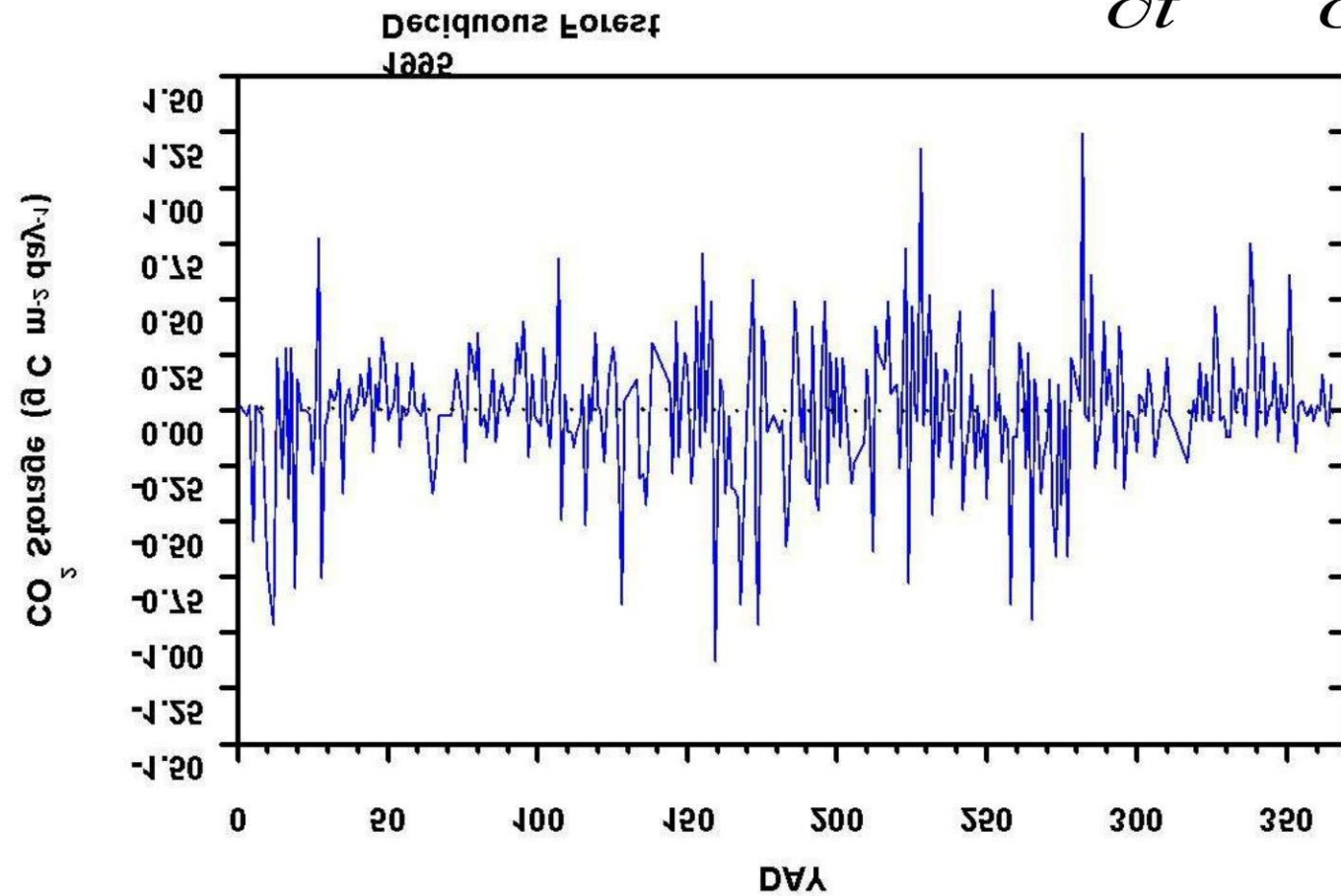


$$\overline{\rho_a} \int_0^h \frac{\partial s}{\partial t} dz$$

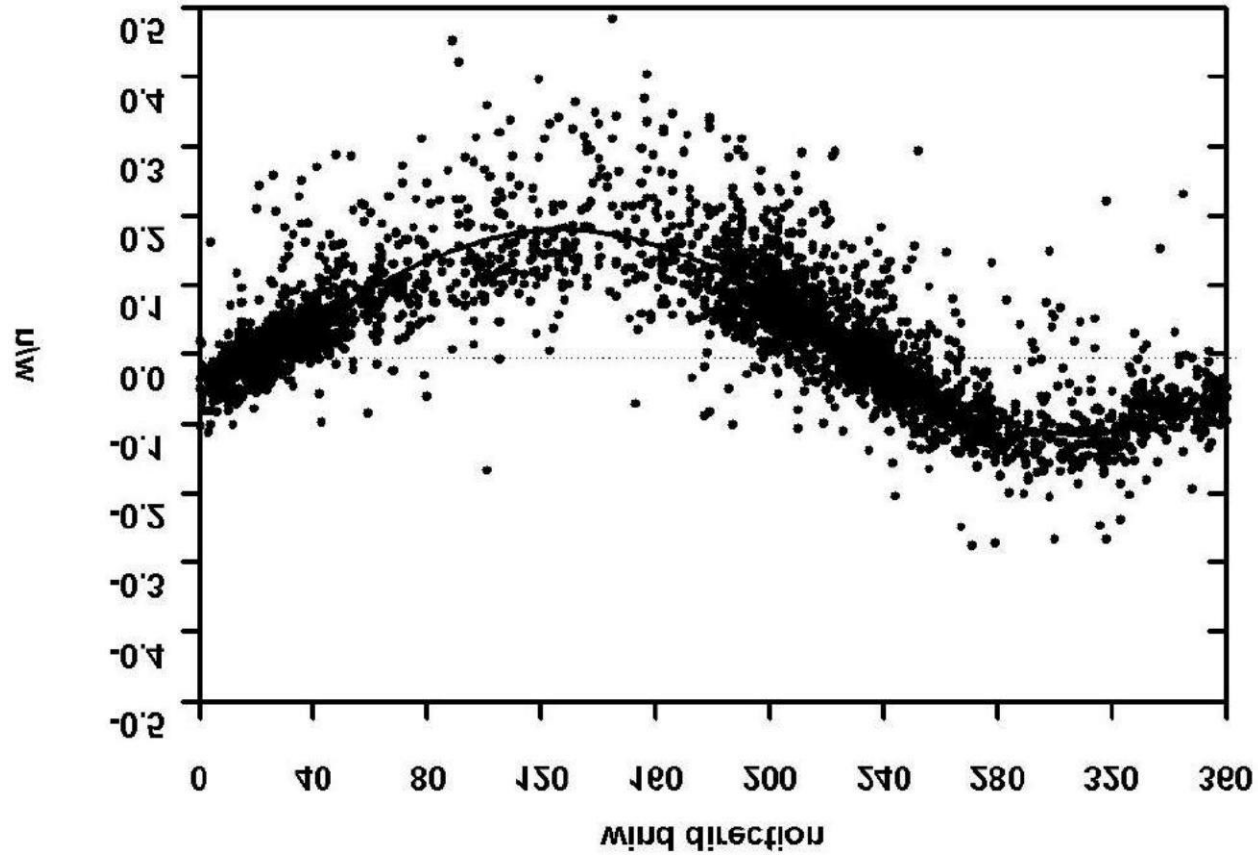


El período de almacenamiento de CO<sub>2</sub> es pequeño en las escalas de tiempo diarias y anuales

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial z}$$



Ajuste planar:  
Terreno ondulado



Efecto del terreno en  $w$  y  $u$ , Oak Ridge, TN

La media medida  $w$  es una función de a  
componente aleatorio,  $w_r$ , y el componente de terreno,  $w_T$

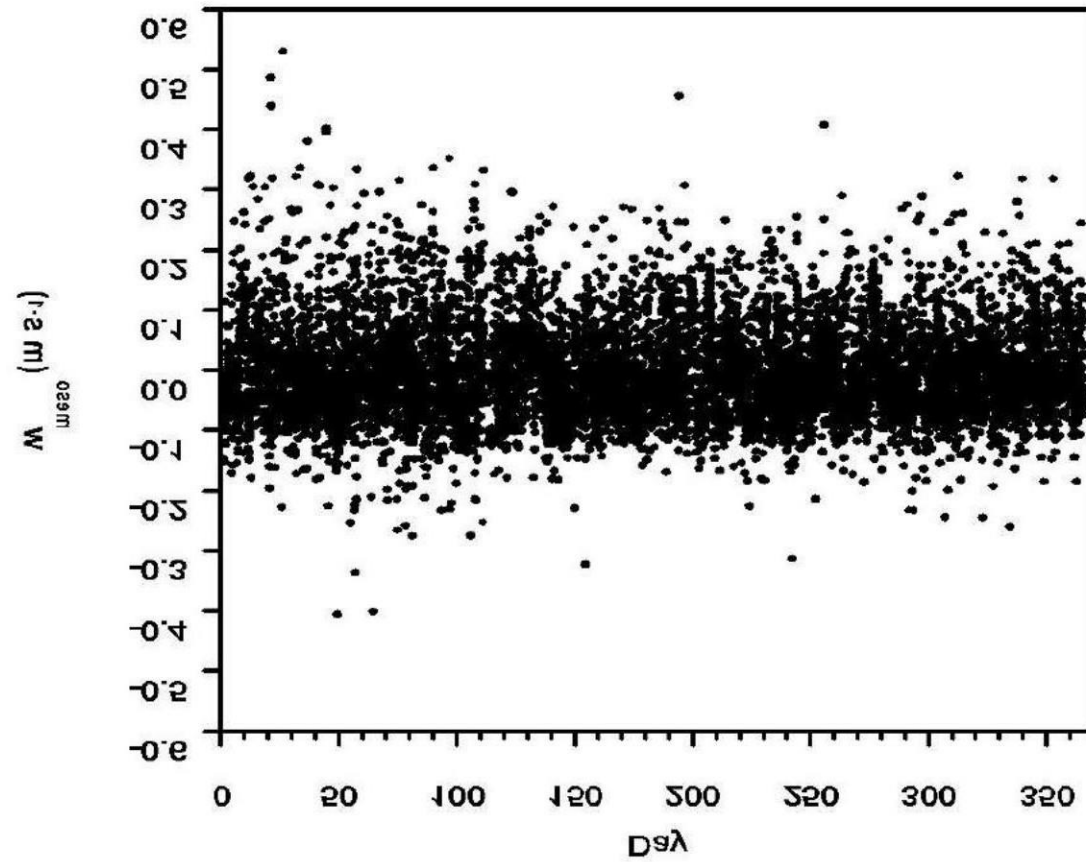
$$\overline{w_m} = \overline{w_r} + \overline{w_T}$$

La velocidad inducida por el terreno,  $w$ , se puede  
calcular con un ajuste planar a  $u_m$  y  $v$

$$\overline{w_T} = b_0 + b_1 \overline{u_m} + b_2 \overline{v_m}$$

Mesoescala w que se gira a cero

$$\overline{w_r} = \overline{w_m} - \overline{w_T}$$



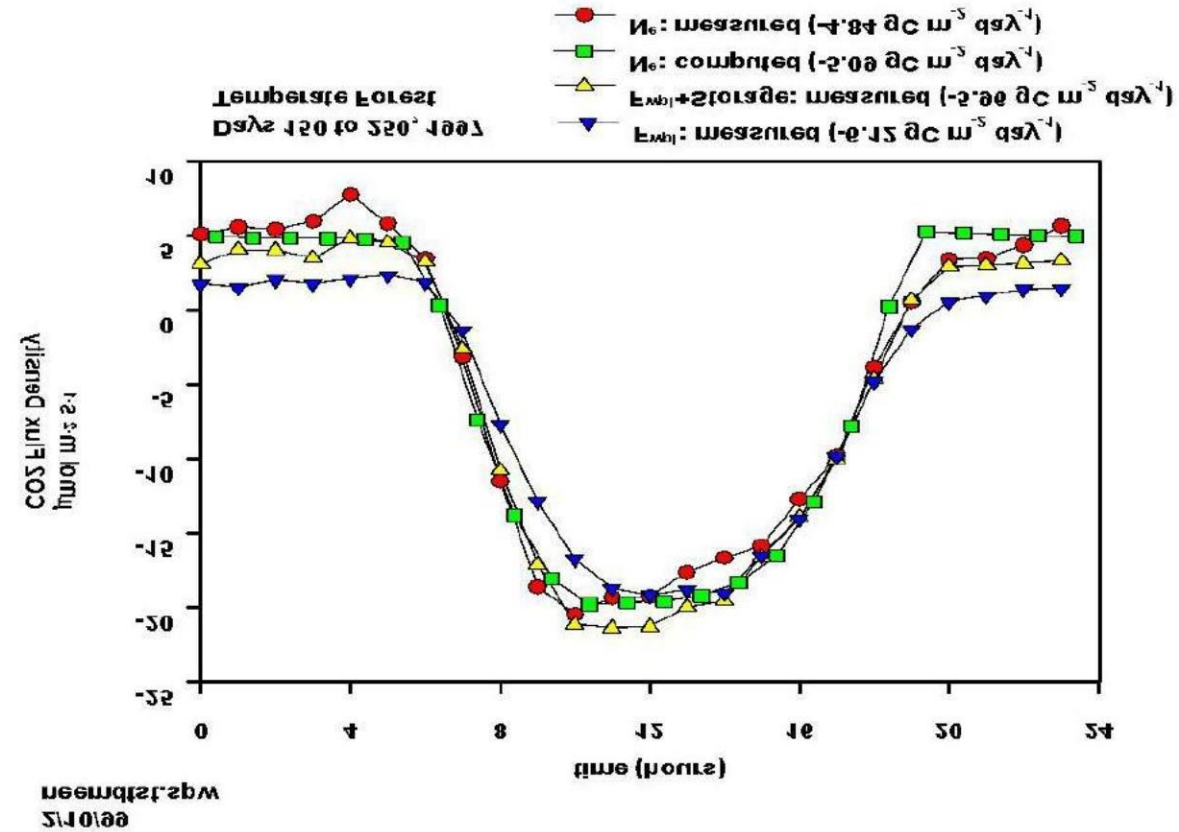
Usando información de wr

$$\begin{aligned} \text{NEE} &\equiv \int_0^{z_r} s dz + (\overline{w'c'})|_{z=0} \\ &= \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz + (\overline{w'c'})_r + \bar{w}_r(\bar{c}_r - \langle \bar{c} \rangle) \end{aligned}$$

# Mejoras con mejores estadísticas de muestreo y

Almacenamiento

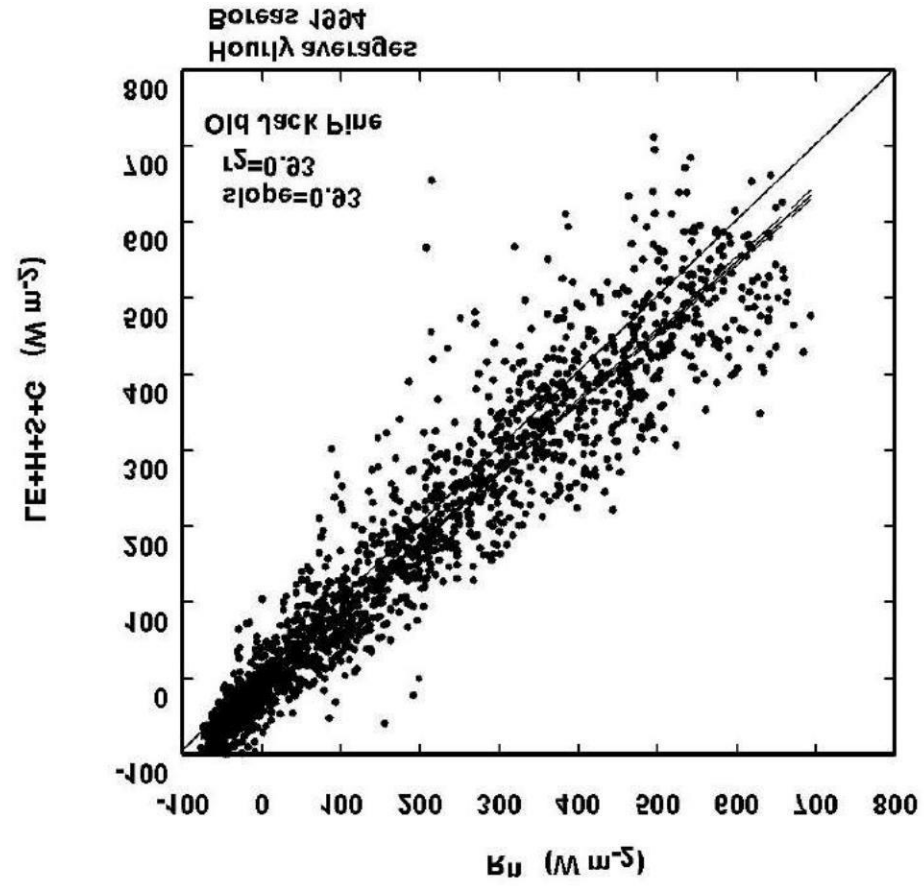
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial z}$$



Baldocchi y otros 2000 BLM

Diagnosticar errores:

Prueba de cierre del balance energético





Agricultural and Forest Meteorology 113 (2002) 223–243

---

AGRICULTURAL  
AND  
FOREST  
METEOROLOGY

---

[www.elsevier.com/locate/agrformet](http://www.elsevier.com/locate/agrformet)

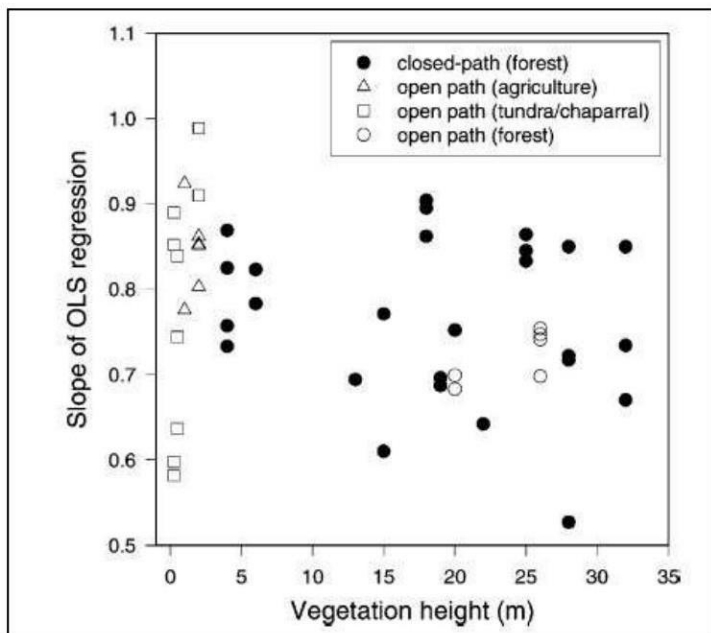
## Energy balance closure at FLUXNET sites

Kell Wilson<sup>a</sup>, Allen Goldstein<sup>b</sup>, Eva Falge<sup>c</sup>, Marc Aubinet<sup>d</sup>, Dennis Baldocchi<sup>b,\*</sup>,  
Paul Berbigier<sup>e</sup>, Christian Bernhofer<sup>f</sup>, Reinhart Ceulemans<sup>g</sup>, Han Dolman<sup>h</sup>,  
Chris Field<sup>i</sup>, Achim Grelle<sup>j</sup>, Andreas Ibrom<sup>k</sup>, B.E. Law<sup>l</sup>, Andy Kowalski<sup>g</sup>,  
Tilden Meyers<sup>a</sup>, John Moncrieff<sup>m</sup>, Russ Monson<sup>n</sup>, Walter Oechel<sup>o</sup>, John Tenhunen<sup>c</sup>,  
Riccardo Valentini<sup>p</sup>, Shashi Verma<sup>q</sup>

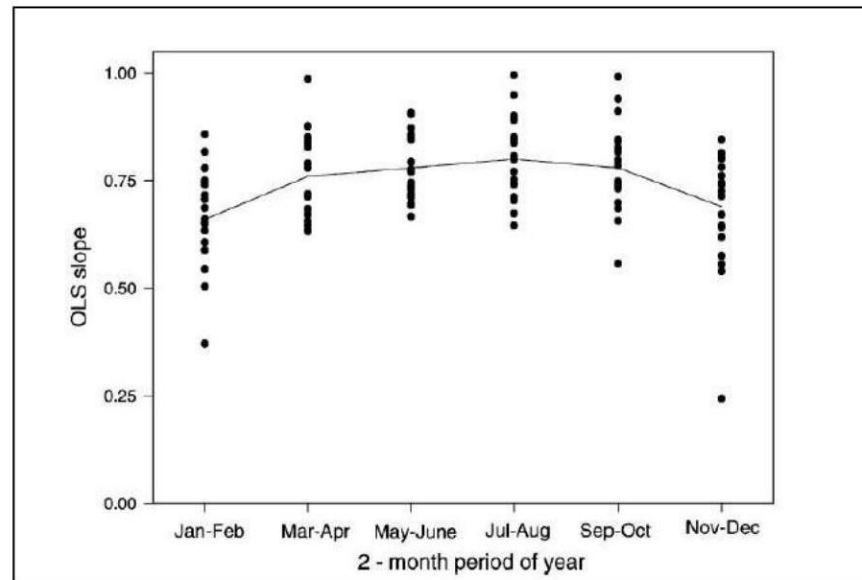


¿Existe un problema de cierre del balance energético?:  
Evidencia de FLUXNET

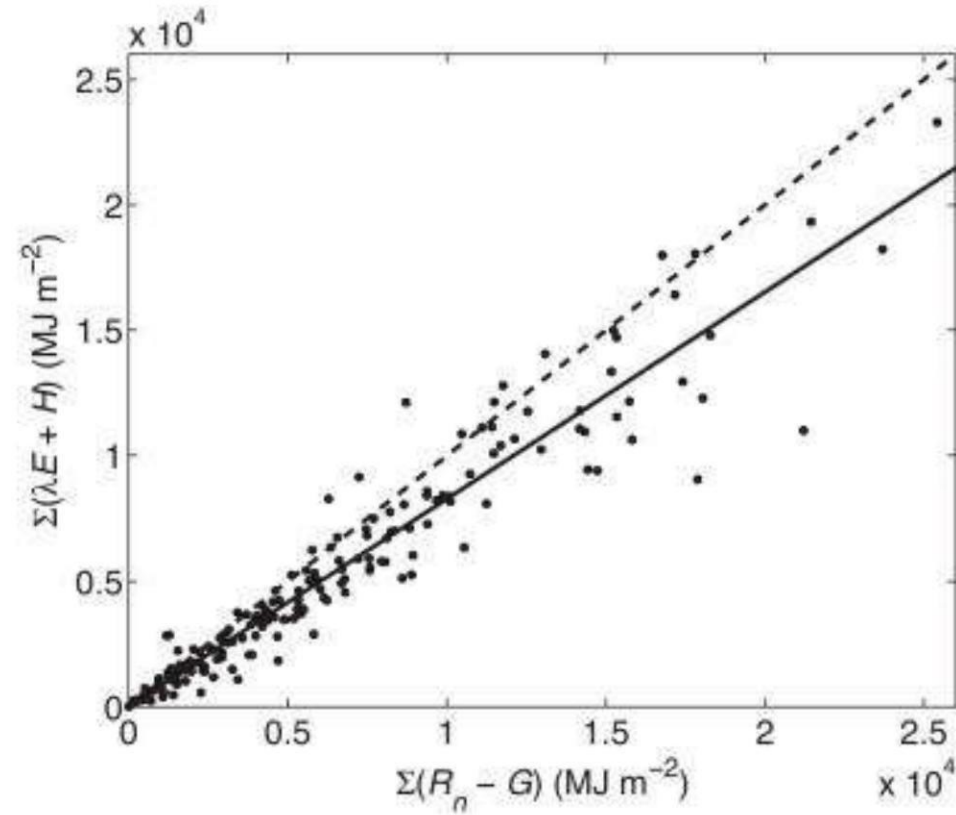
Rugosidad del instrumento/dosel



Horario/Temporada



# Cierre de Fluxnet



Stoy y otros, 2013, AgForMet

## Fuentes potenciales de balance energético, Desequilibrio

- Errores de medición

- Instrumentos

- Temperatura sónica vs temperatura virtual • IRGA de trayectoria abierta  
vs trayectoria cerrada

- Flujos de remolinos

- Duración y método de promediado •  
Funciones de transferencia

- Ángulo de flujo

- Flujo de calor del suelo

- Almacenamiento

- Profundidad

- Errores de muestreo •

- Muestreo insuficiente de Rnet y G • Desajuste  
de huellas entre Rnet + G y  $\lambda E + H$

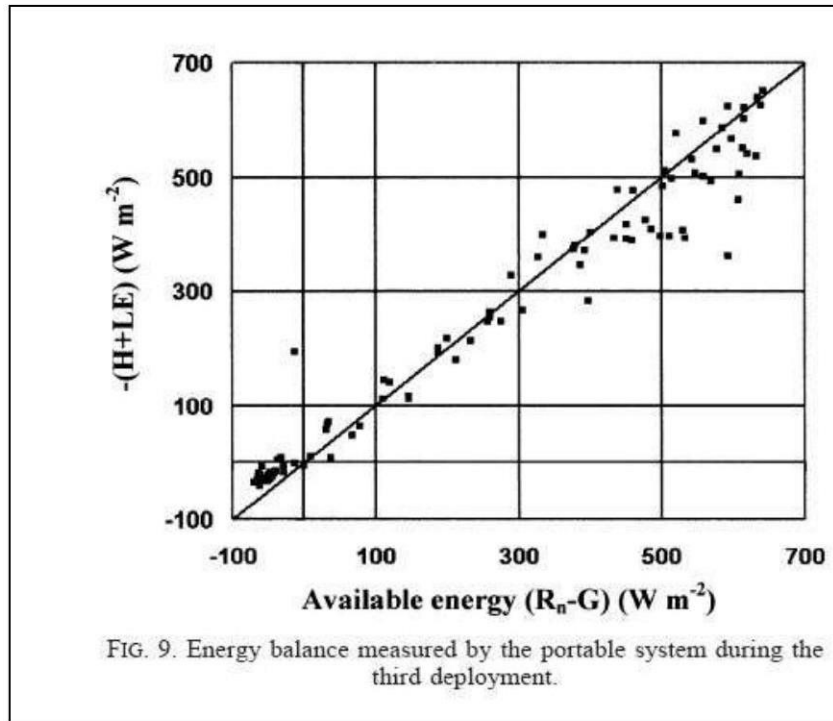
- Otros procesos

- Advección

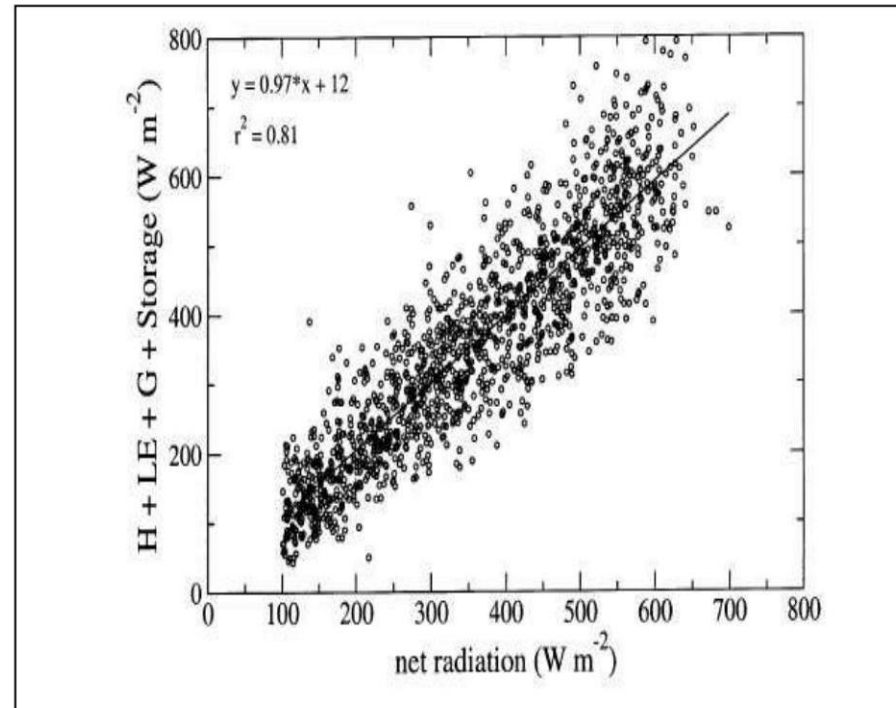
- Fotosíntesis •

- Almacenamiento de calor en la vegetación

¿Existe un problema de cierre?:  
Evidencia contraria



Billesbach y otros, 2004



Meyers y Hollinger, 2004

Muchos estudios no consideran bien, o en absoluto, el almacenamiento de calor de los bosques y cierran el balance energético cuando lo hacen

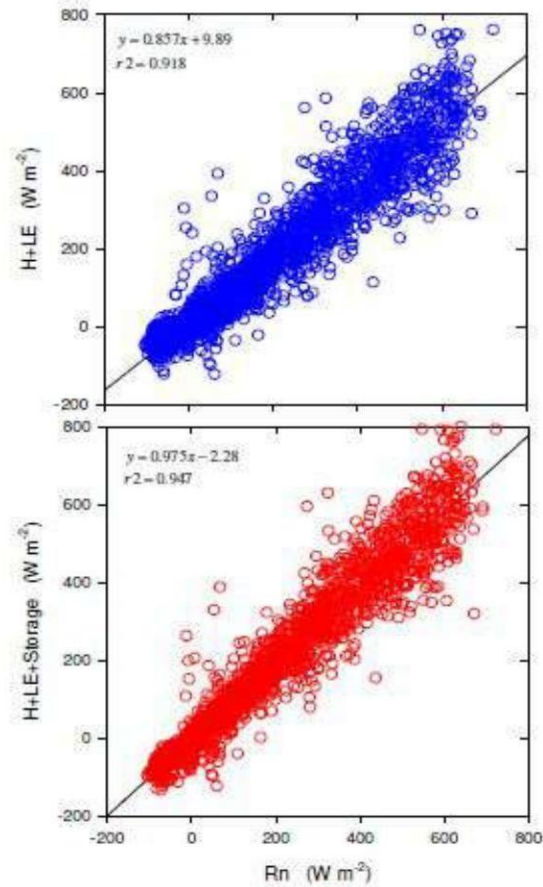
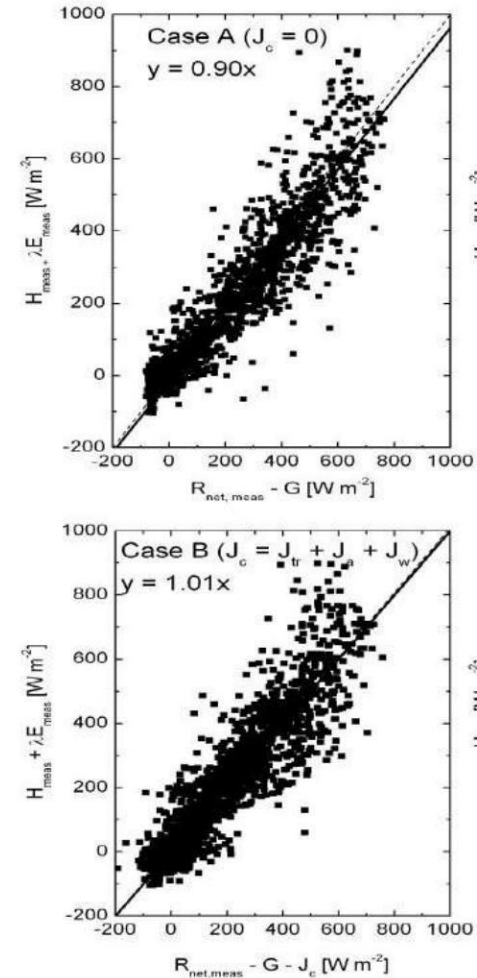
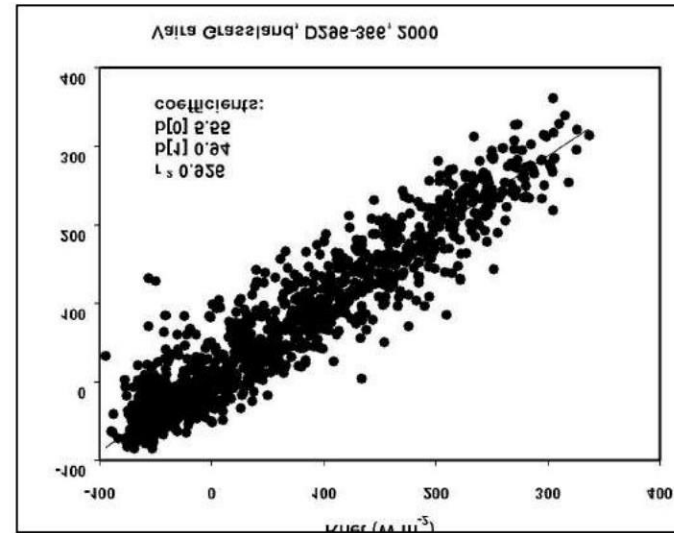
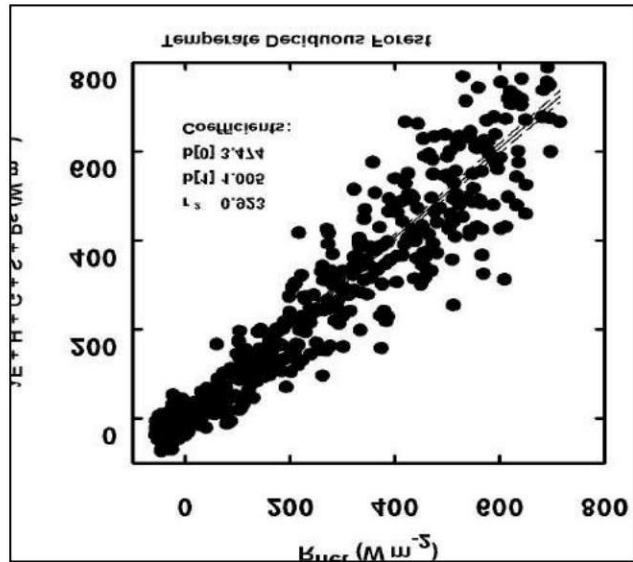
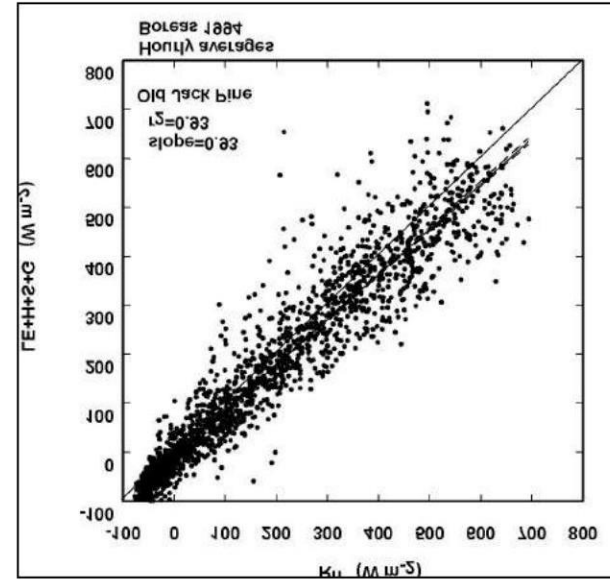
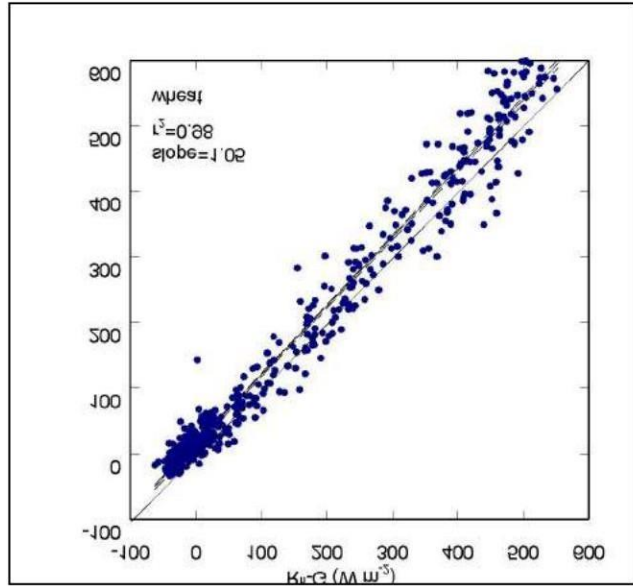


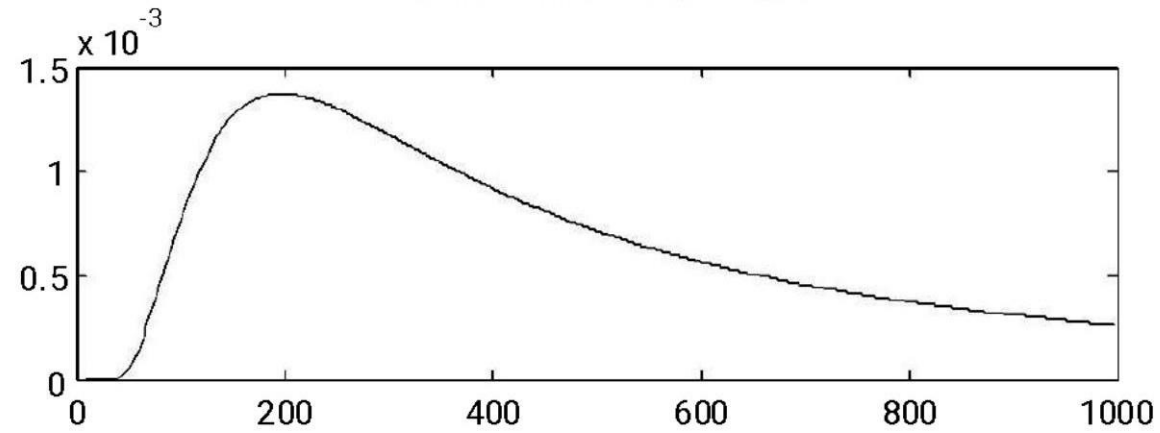
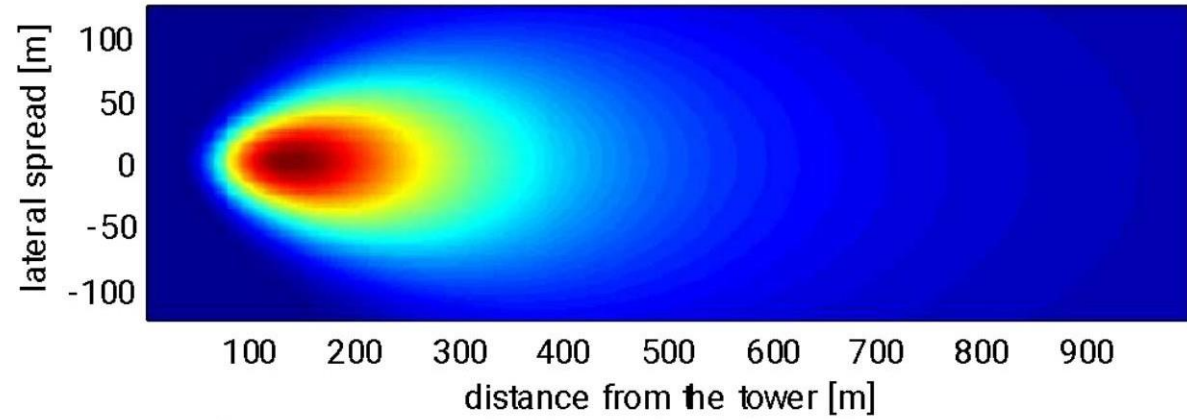
Fig. 8. The sum of the turbulent fluxes versus net radiation without (top) storage flux and with (bottom) the total storage flux included.



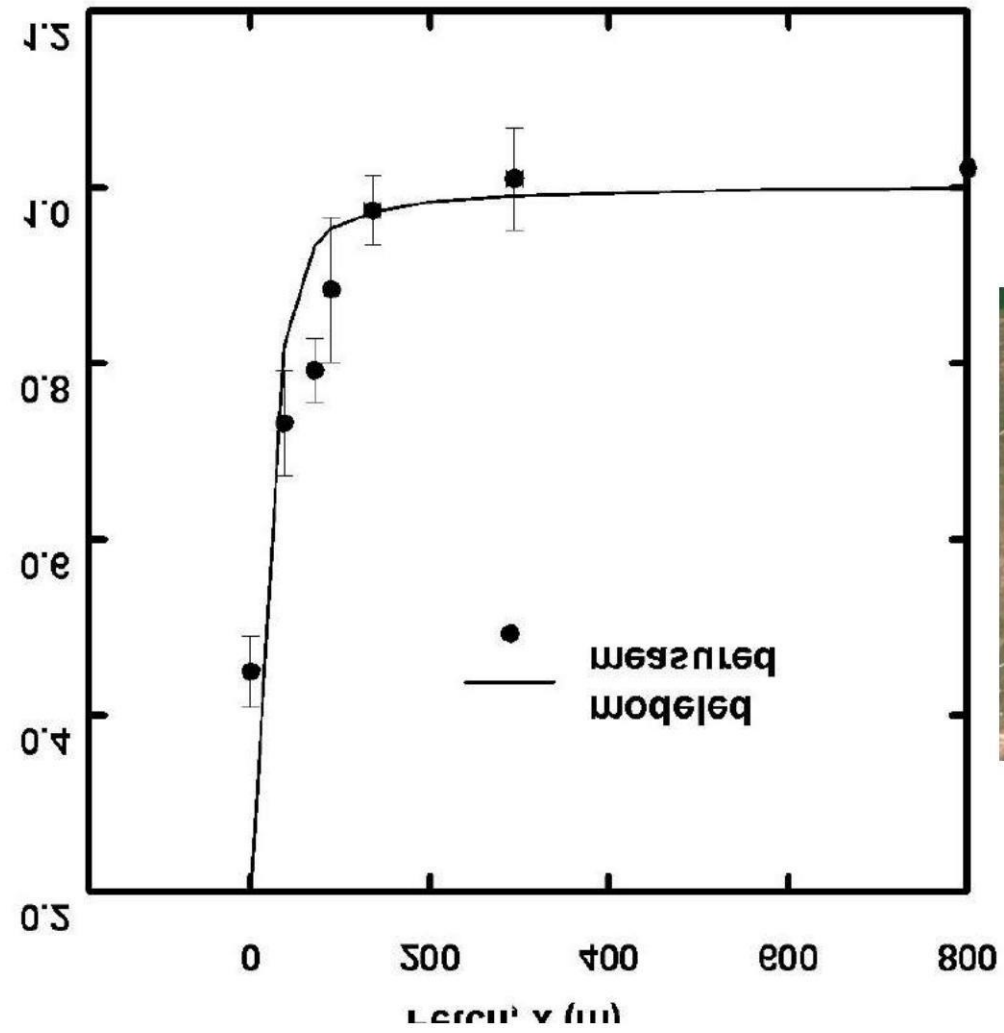
# Prueba de cierre del balance energético como control de calidad



Elección de su sitio:  
Modelo de huella 2D de DettoHsieh y Fetch

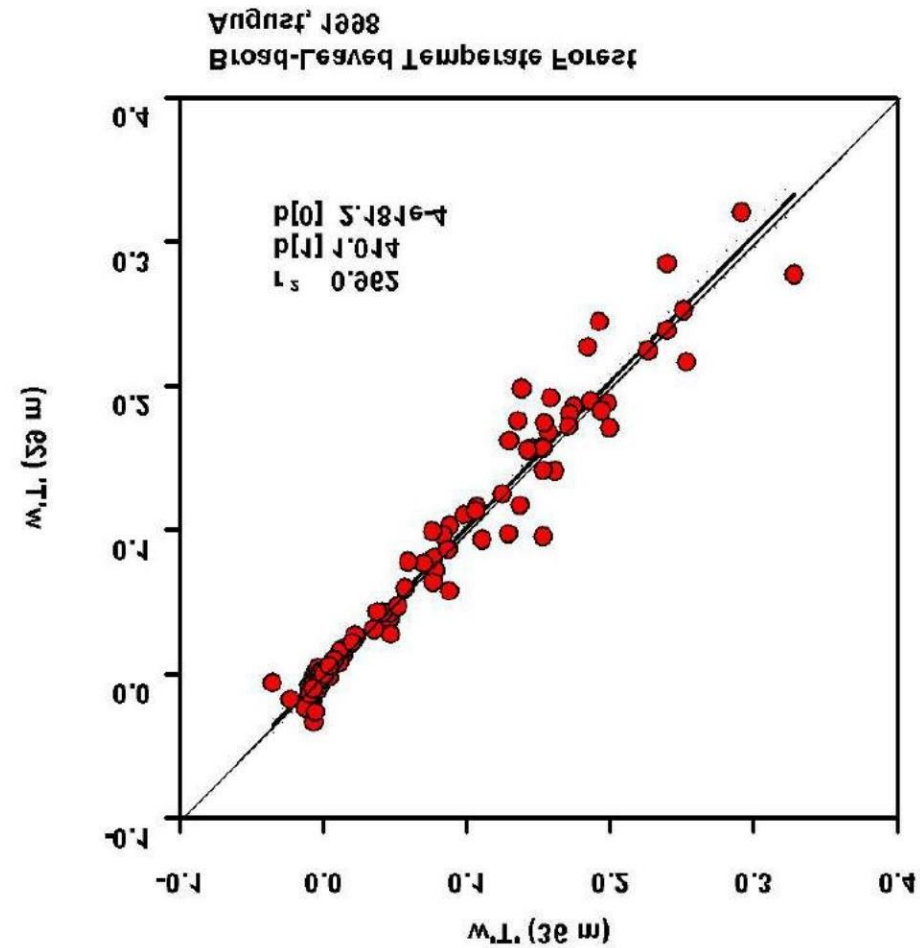


# Representatividad, advección y efectos de borde





# Prueba de divergencia de flujo: medir flujos a dos alturas

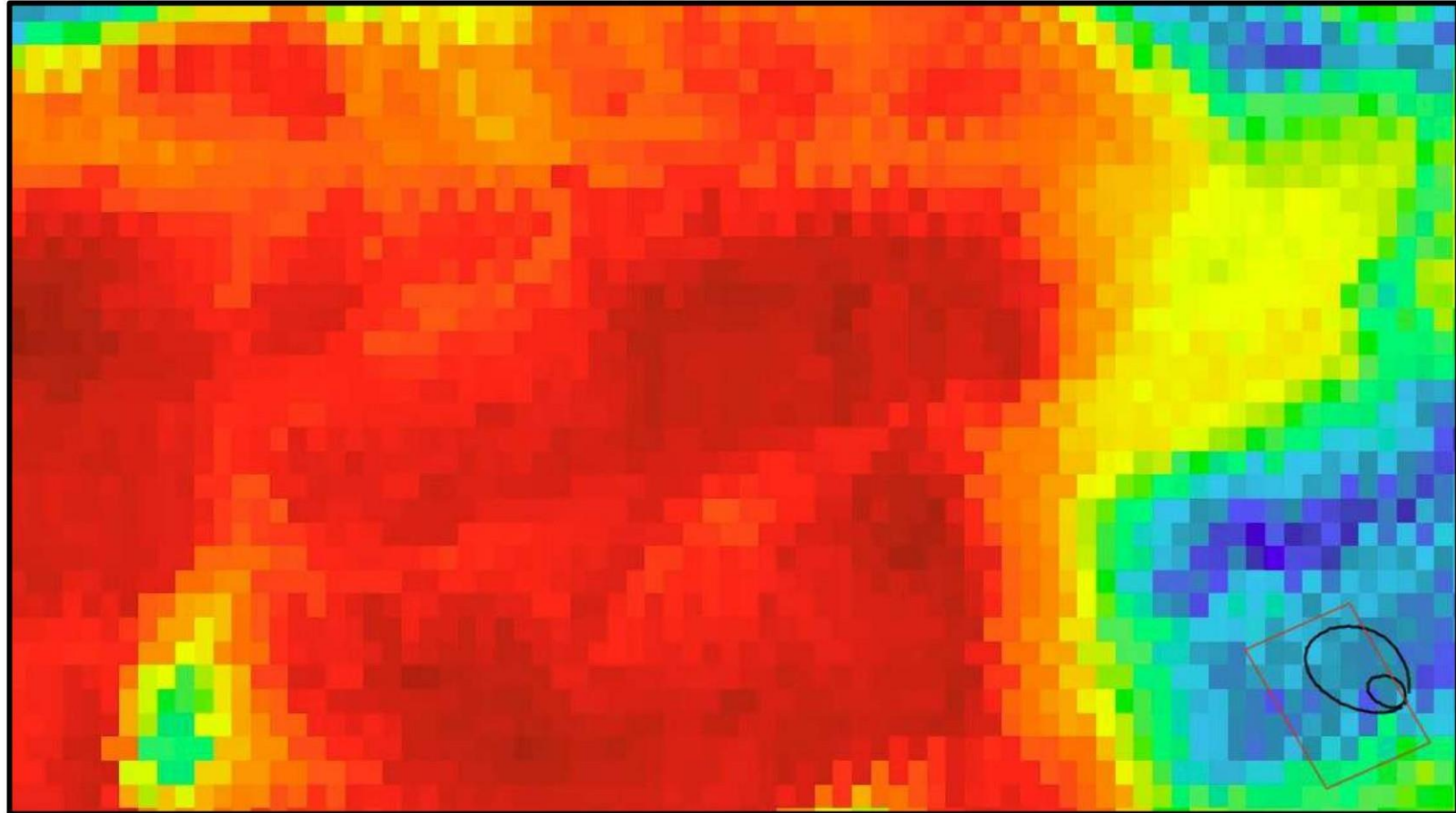
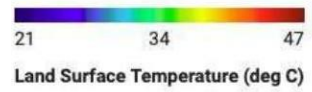


Baldocchi y otros 2000 BLM

LST de ECOESTRÉS

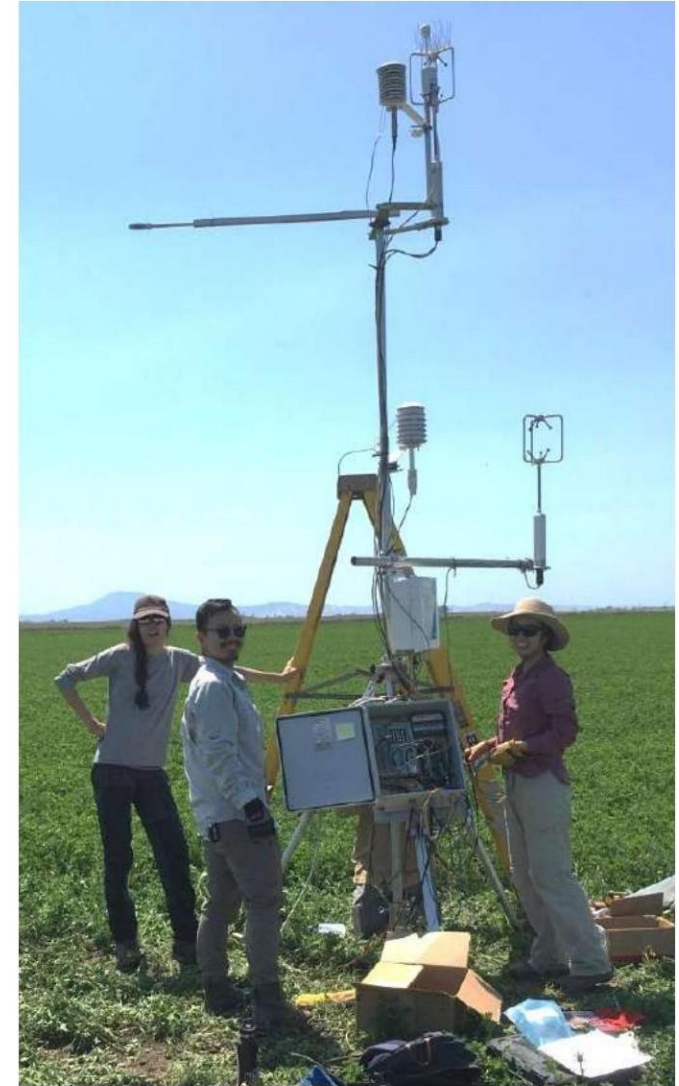
29/05/2022 14:34

## Transición de seco a húmedo



Alfalfa Bouldin, Tianxin Wang

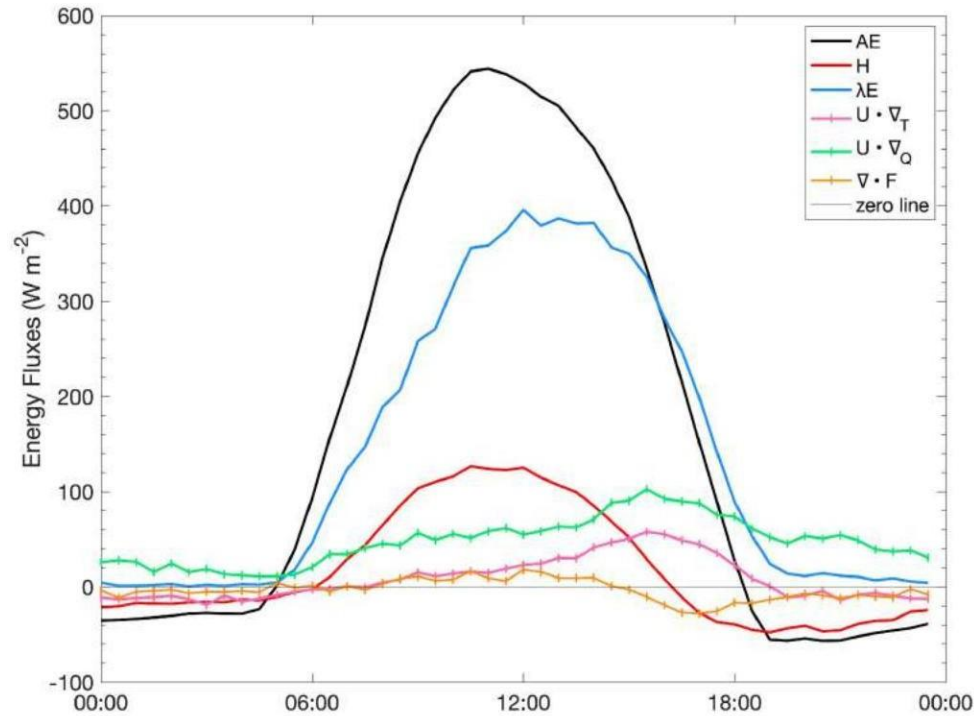
# ACTO II: Campaña de Advección 2022



Sensor de flujo	Frecuencia
-----	20 Hz
Sónico	20 Hz
HMP155A	0,1 Hz

Media diaria de

2022: del 18 al 25 de mayo y del 20 al 27 de junio y del 16 al 22 de julio (n=1104)



Negro: Rnet – G – G\_almacenamiento

Rojo: H corregido espectralmente

Azul: LE corregido espectralmente

Rosa: Advección de calor a 4 m

Divergencia del flujo naranja desde los 4 m hasta el dosel

La advección de calor y humedad debilitó el H y mejoró el LE. El LE no aumentó tan drásticamente debido a la alfalfa menos productiva (GPP) en 2022.

Equilibrio advectivo:

$$\int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dz = - \int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial \overline{w'T'}}{\partial z} dz$$

$$\int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \overline{U(z)} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dz + \int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial \overline{w'T'}}{\partial z} dz$$

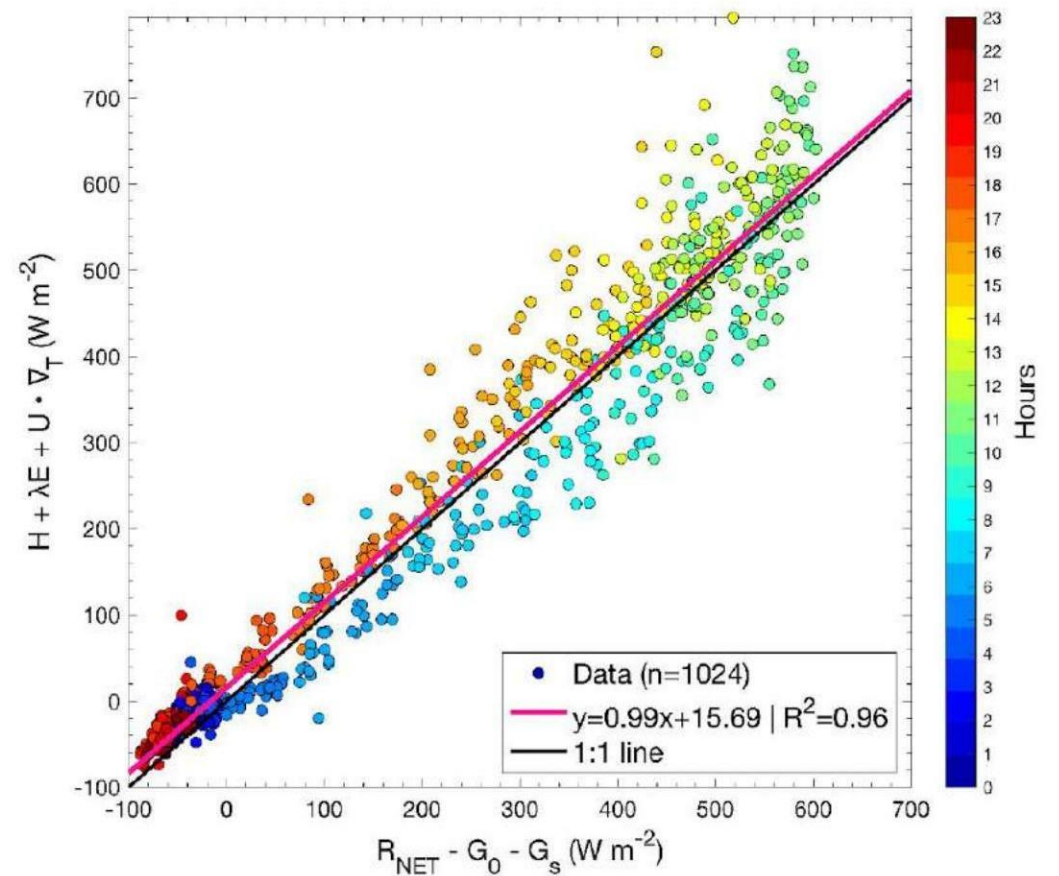
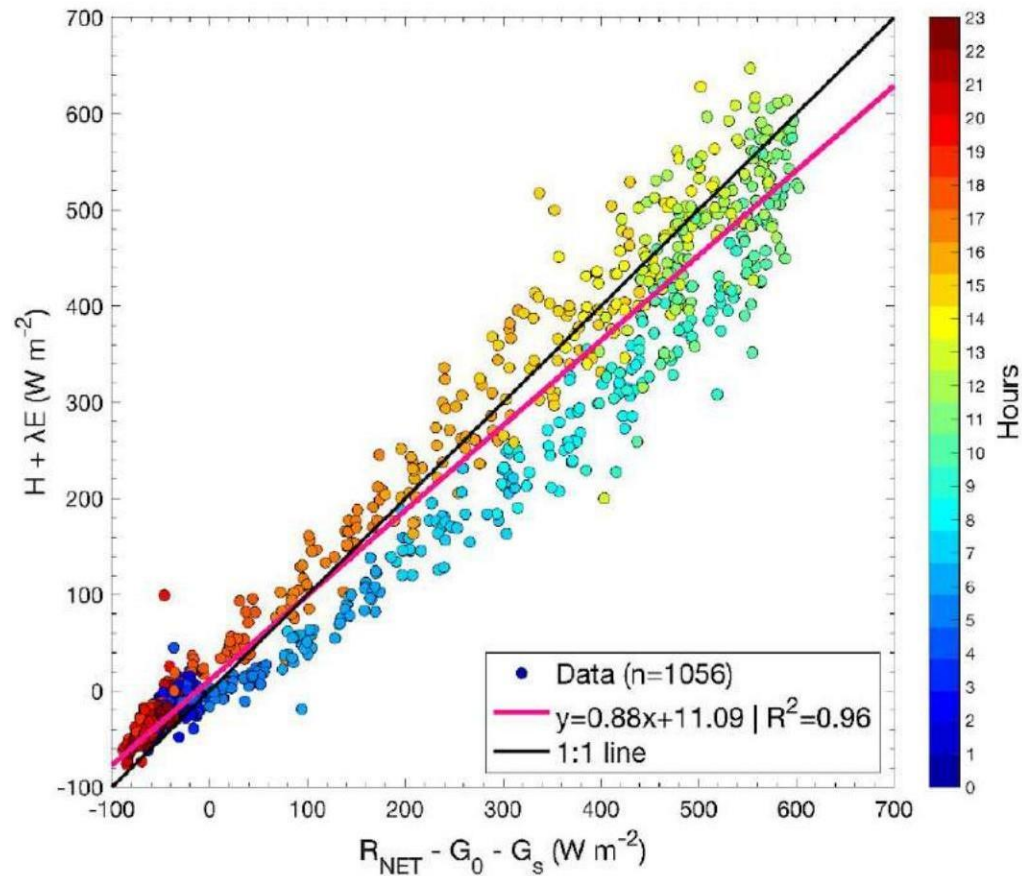
||

5.02 Wm<sup>-2</sup>

Media diaria de

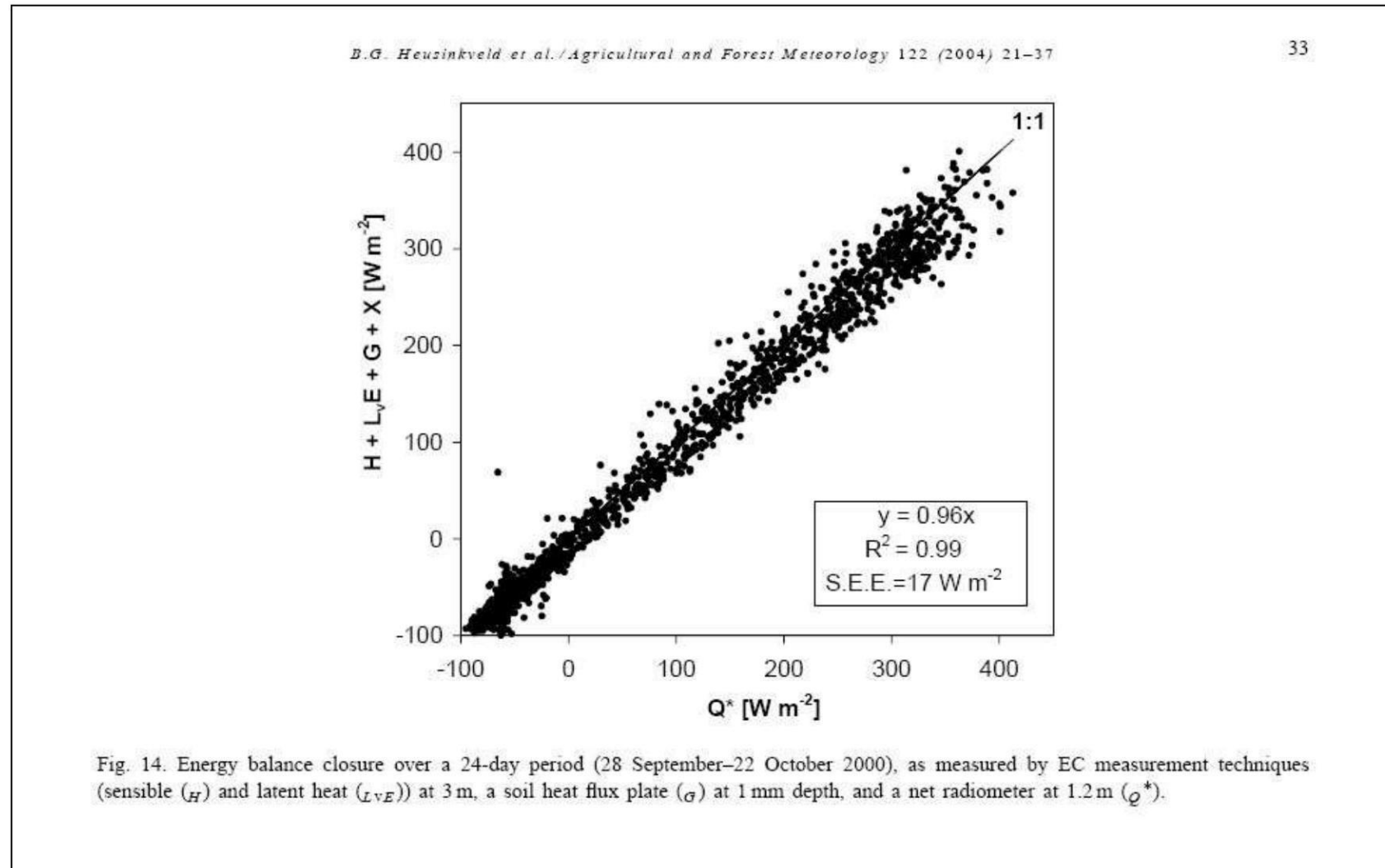
2022: del 18 al 25 de mayo y del 20 al 27 de junio y del 16 al 22 de julio (n=1104)

La contabilización de la advección de calor y humedad mejoró el cierre del balance energético en un 11 %



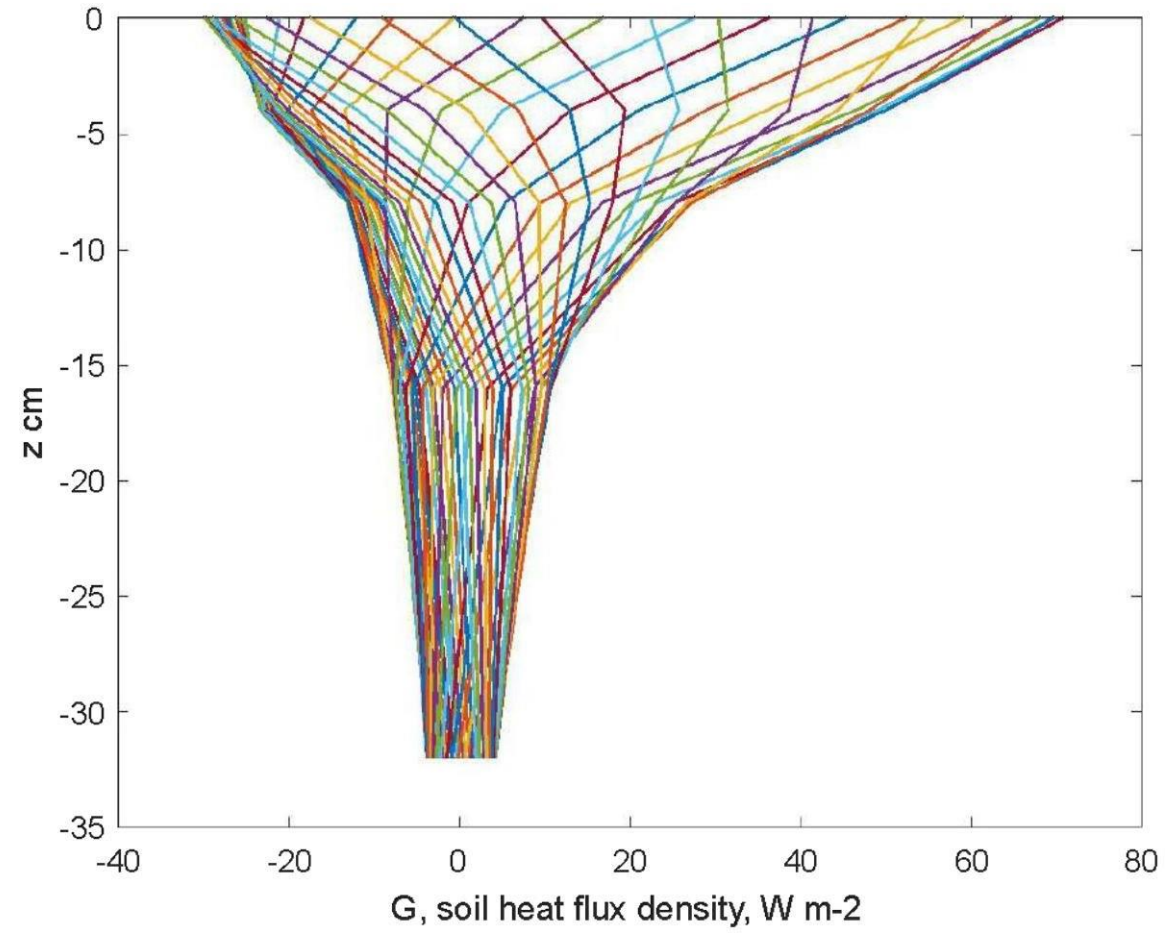


## Mejor equilibrio energético con el sensor Shallow G

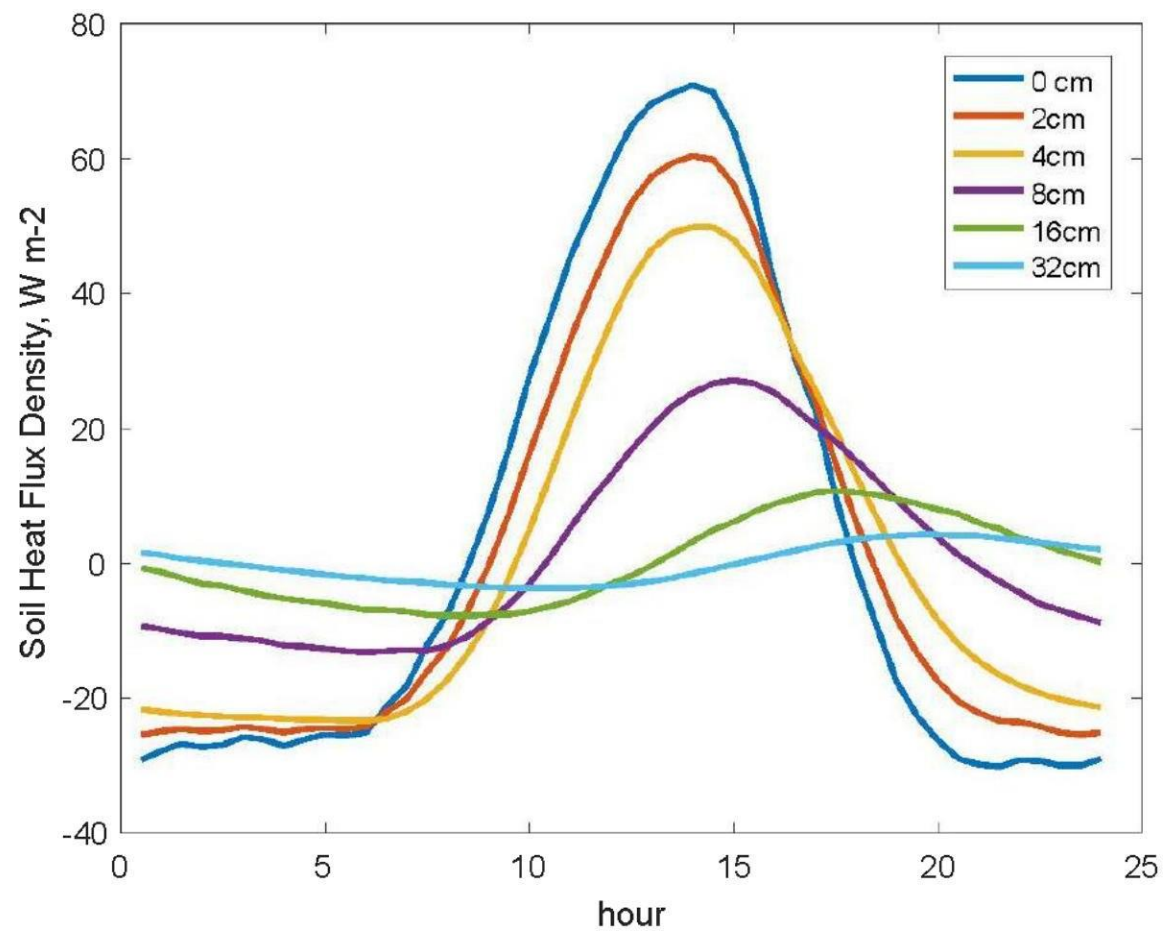


Medir la divergencia del flujo de calor del suelo y extrapolarlo a cero

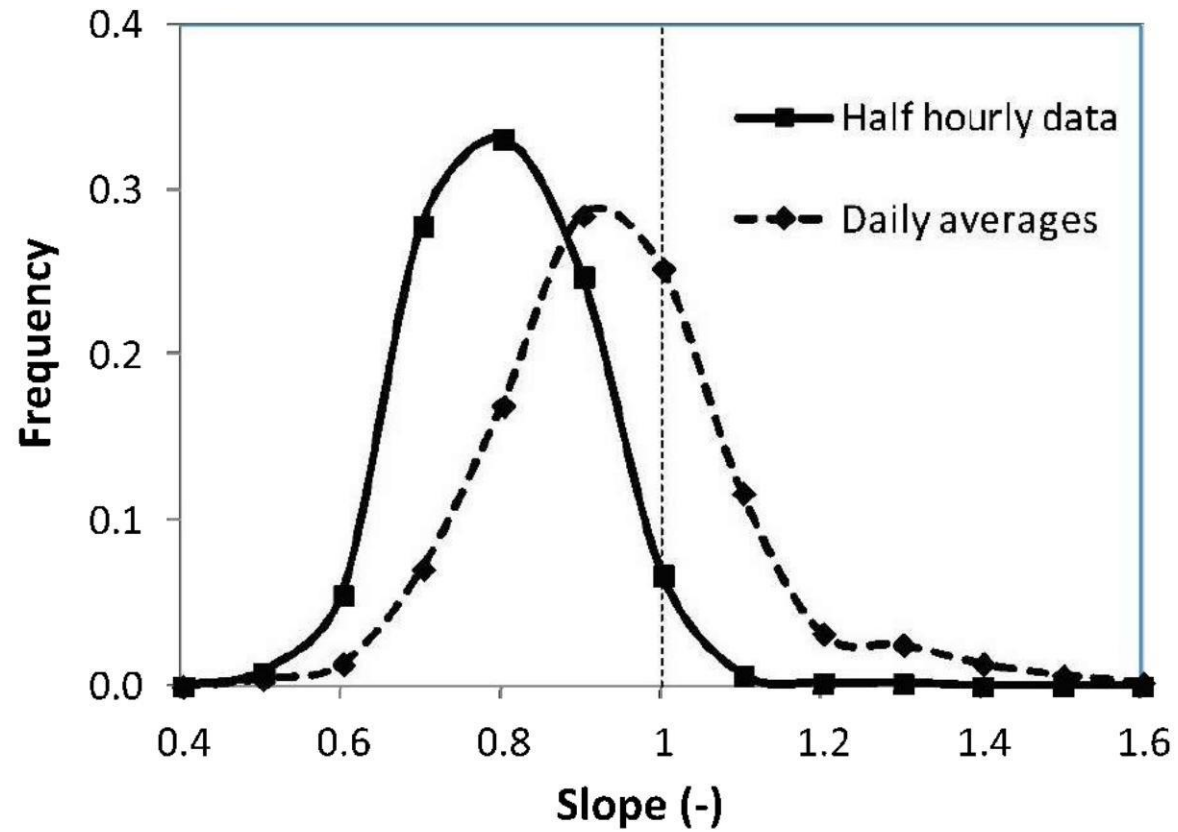
Perfil horario medio desde 2013



### Patrón diario medio desde 2013







**fig. 5.** Frequency distributions for the slope of  $H + E$  versus  $R_n - G_0$  (forced through ero) for half-hourly and daily averages of measurements reported in the La Thuile dataset.

# No tires al bebé junto con el agua del baño

- Se puede tener confianza en la covarianza de Foucault si se cumplen los supuestos, incluso si el cierre del balance de energía es deficiente.
- Ejemplos de correspondencia del Balance Hídrico

# Desafíos/Puntos para llevar a casa

- Mantener en funcionamiento los sitios de Flux a largo plazo
  - Requiere personas y recursos
  - Visitar el sitio con frecuencia
  - Calibrar, calibrar...
- Interpretar flujos sobre complejos paisajes con fuentes y sumideros
  - Admite múltiples torres de flujo
  - Realiza la evaluación de términos de Presupuesto de conservación
- Interpretar flujos con control remoto
  - Imágenes de detección y modelos de huella de flujo
- Compartir y distribuir datos



# **Mensaje para llevar a casa sobre la aplicación de Eddy Método de covarianza en condiciones no ideales**

- Saber cuándo romper y doblar las reglas
- Cumplir con los principios rectores de Ecuación de conservación
- Diseñar un experimento que mida el flujo Divergencia y almacenamiento, además de Covarianza, cuando los sitios no son ideales