

Teoría de Turbulencia y su Aplicación de Eddy Covariance en la Agricultura

Abraham Rojano¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México Texcoco, C.
P. 056230. Chapingo, México.

Resumen

En aplicaciones agrícolas, como el análisis de cultivos de maíz, trigo y cebada, esta técnica permite evaluar la eficiencia de estos cultivos en el intercambio de gases, que es fundamental para comprender los procesos de fotosíntesis y la captura de carbono. La combinación de la teoría de la turbulencia y el Eddy Covariance facilita la toma de decisiones para optimizar el uso de recursos, como el agua y los nutrientes, al proporcionar datos precisos sobre los flujos de calor y CO₂ en distintos tipos de cubiertas vegetales.

Palabras Clave: modelo, flujo, concentración, velocidad.

Abstract

In agricultural applications, such as the analysis of corn, wheat and barley crops, this technique allows evaluating the efficiency of these crops in gas exchange, which is essential to understand the processes of photosynthesis and carbon capture. The combination of turbulence theory and Eddy Covariance facilitates decision making to optimize the use of resources, such as water and nutrients, by providing accurate data on heat and CO₂ fluxes in different types of vegetation covers.

Keywords: model, flow, concentration, velocity.

Introducción

La teoría de turbulencia es fundamental en la comprensión de los procesos de intercambio de gases y calor en la superficie terrestre, especialmente en contextos ecológicos y meteorológicos. Una de las aplicaciones más relevantes de esta teoría es el método de **Eddy covariance** (covarianza de eddies), utilizado para medir flujos de gases (como CO₂ y vapor de agua) entre la superficie terrestre y la atmósfera. Este artículo explora los principios de la teoría de turbulencia y su implementación en el método de Eddy covariance. El método **Eddy covariance** (EC), o "covarianza de remolino", es una técnica clave en la medición de los flujos de gases y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su desarrollo ha sido fundamental para la comprensión de procesos ecológicos, climáticos y atmosféricos, y su evolución a lo largo del tiempo ha estado marcada por avances científicos y tecnológicos

significativos. Este artículo explora la historia y evolución del método Eddy covariance, destacando los hitos clave que han permitido su uso generalizado en estudios de cambio climático, carbono, agua y energía (McMillen, R. T., 1988; Aubinet, M., et al., 2000; Katul, G. G., et al., 2012).

Orígenes del Estudio de la Turbulencia

El método Eddy covariance se basa en el análisis de los remolinos (o "eddies") que transportan masa y energía en flujos turbulentos. Los primeros estudios sobre la turbulencia atmosférica datan de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con los trabajos pioneros de científicos como **Osborne Reynolds** y **Ludwig Prandtl**. Estos investigadores sentaron las bases para la comprensión de los flujos turbulentos, introduciendo conceptos clave como el número de Reynolds, que describe la transición entre flujos laminares y turbulentos.

La aplicación de estos principios al estudio del intercambio de gases en la atmósfera comenzó a tomar forma con la llegada de instrumentos más precisos para medir el movimiento del aire y las concentraciones de gases. La teoría de la turbulencia y la dinámica de fluidos proporcionaron el marco conceptual para entender cómo los remolinos transportan gases como el dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua y el calor entre la superficie y la atmósfera.

Desarrollo de los Primeros Sistemas de Medición

El verdadero auge del método Eddy covariance ocurrió a mediados del siglo XX, cuando se desarrollaron tecnologías que permitían medir simultáneamente el flujo de aire turbulento y las concentraciones de gases en tiempo real. A finales de la década de 1950 y principios de 1960, se realizaron las primeras mediciones de campo con este método, pero los instrumentos disponibles en esa época eran limitados en cuanto a precisión y frecuencia de muestreo. Uno de los primeros

avances significativos fue la creación de **anemómetros sónicos** en los años 60, que permitían medir con precisión la velocidad y dirección del viento a alta frecuencia, un requisito crucial para capturar la naturaleza turbulenta del flujo de aire. Estos anemómetros, junto con sensores de gases que podían registrar concentraciones de CO₂ y vapor de agua, formaron la base de los primeros sistemas Eddy covariance rudimentarios.

A lo largo de las décadas de 1970 y 1980, los avances en la instrumentación electrónica y la informática llevaron a mejoras significativas en la precisión y la capacidad de procesamiento de datos del método Eddy covariance. Durante este tiempo, los científicos también desarrollaron las bases teóricas para interpretar los datos de EC, estableciendo métodos estadísticos para corregir errores inherentes al proceso de medición.

Un hito clave fue el desarrollo del **análisis de frecuencia de alta resolución**, que permitió a los investigadores capturar y analizar los remolinos de aire que transportan gases a través de

la atmósfera. A medida que los sensores y los sistemas de adquisición de datos se volvían más sofisticados, se hicieron posibles estudios a mayor escala en diferentes ecosistemas, desde bosques hasta tundras y praderas. Además, la teoría de la capa límite atmosférica (ABL) ayudó a refinar las técnicas de medición. Se reconoció que para obtener mediciones precisas de los flujos de gases, el sistema de Eddy covariance debía ubicarse en una región donde el flujo de aire fuera representativo del área de interés, es decir, dentro de la **capa superficial turbulenta**.

El método Eddy covariance experimentó una expansión significativa en la década de 1990, gracias a la creación de redes internacionales de investigación como **FLUXNET**, una red global de estaciones de medición EC establecida en 1997. Esta red permite el monitoreo continuo del intercambio de gases y energía en diversos ecosistemas del mundo, lo que ha contribuido a una comprensión más detallada del ciclo del carbono y del agua a escala global. Otro factor importante en esta expansión fue el desarrollo de **analizadores de gases basados en espectroscopía infrarroja de absorción no dispersiva (NDIR)**. Estos analizadores permitieron medir las concentraciones de gases como el CO₂ y el vapor de agua con una precisión sin precedentes, facilitando el uso generalizado del método EC en estudios de larga duración. A partir de este período, los datos de Eddy covariance comenzaron a utilizarse de manera intensiva para estudiar los efectos del cambio climático, particularmente en relación con los ciclos de carbono y agua en diferentes ecosistemas. Estos estudios han sido fundamentales para

comprender cómo los ecosistemas terrestres absorben o emiten CO₂, un aspecto crucial para modelar el futuro climático del planeta (Baldocchi, D., 2003; Aubinet, M., Vesala, T., & Papale, D. (Eds.). ,2012; Wilson, K. B., et.al.,2000).

Teoría de Turbulencia

La turbulencia es un fenómeno complejo que se produce en fluidos (como el aire o el agua) cuando la viscosidad no es suficiente para disipar la energía cinética generada por movimientos irregulares. Estos movimientos pueden ser descritos mediante **ecuaciones de Navier-Stokes**, que son ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos. Sin embargo, resolver estas ecuaciones de forma exacta en situaciones turbulentas es extremadamente complicado y se pueden abordar con

1. Ecuaciones de Navier-Stokes

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

t es el tiempo,

ρ es la densidad del fluido,

p es la presión,

ν es la viscosidad cinemática,

f representa las fuerzas del cuerpo (por ejemplo, la gravedad).

2. Ecuación de Continuidad:

Esta ecuación es una representación de la conservación de la masa. En el contexto de la atmósfera, se utilizan para analizar el transporte de gases y flujos en un sistema cerrado o controlado.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Condiciones de frontera:

- En la entrada y salida del sistema: condiciones de flujo constante.

3. Ecuación de Energía:

Esta ecuación describe cómo la energía se conserva en un sistema de flujo, permitiendo el análisis de los intercambios de energía entre la superficie y la atmósfera.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{q} + Q$$

Condiciones de frontera:

- En la superficie: intercambio de energía definido (p. ej., calor, radiación).

4. Modelo de Capa Límite:

Se centra en estudiar el comportamiento del flujo cerca de la superficie terrestre, donde las interacciones de mayor importancia se producen. Este modelo es fundamental para entender cómo la energía y los gases se intercambian entre la superficie y la atmósfera (ver Figura 1).

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Condiciones de frontera:

- En la superficie terrestre: $z_0 = 0$ (altura de referencia).

5. Modelo de Mezcla Turbulenta:

Este modelo se enfoca en los remolinos (eddies) que mezclan gases y energía en la atmósfera. Los eddies transportan gases y energía de un punto a otro de manera turbulenta, y este modelo permite la comprensión de estos intercambios.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C)$$

Condiciones de frontera:

- En la superficie: concentración fija o flujo constante.

6. Modelo de Landau-Lifshitz:

Este modelo describe la turbulencia en términos de fluctuaciones y estructuras en el flujo, proporcionando una base teórica para análisis estadístico de la turbulencia.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nu \nabla^2 u + f$$

Condiciones de frontera:

- En el límite del sistema: condiciones de flujo uniforme.

7. Modelo de Kolmogorov:

Este modelo presenta una teoría sobre la cascada de energía en turbulencia, describiendo cómo la energía se disipa en escalas menores. Es ampliamente utilizado para estudiar la estructura de la turbulencia en escalas pequeñas.

$$\epsilon = \nu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$$

Condiciones de frontera:

- En la superficie: condiciones de no deslizamiento y flujo uniforme.

8. Modelo de Bigelow:

Este modelo se emplea para describir la turbulencia relacionada con la dispersión de contaminantes en la atmósfera, integrando factores de turbulencia y dispersión.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + Q$$

Condiciones de frontera:

- En la superficie: concentración definida o condiciones de flujo constante.

9. Modelo de Turbulencia de Mezclado:

Este modelo se centra en el intercambio de masa y energía en el contexto de la turbulencia y es utilizado para simular procesos en ecosistemas, como la transferencia de gases entre la vegetación y la atmósfera.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C + R$$

Condiciones de frontera:

- En la superficie: condiciones de intercambio de gases definidas.

Cada uno de estos modelos ofrece una perspectiva única sobre la dinámica de fluidos y la turbulencia, y su aplicación depende del contexto específico que se esté estudiando. Algunos

modelos, como el de Kolmogorov, son más adecuados para entender los procesos a escalas pequeñas, mientras que otros, como el de Navier-Stokes, ofrecen una descripción general del comportamiento de los fluidos en una gama más amplia de condiciones. Así una explicación sobre el modelo de Kolmogorov es el siguiente empezando por

A. Viscosidad de Eddy

En un flujo turbulento, además de la viscosidad molecular ν , se introduce la **viscosidad de Eddy** ν_t , la cual representa el efecto de la transferencia de momento turbulento en el flujo medio. En este sentido, la **viscosidad efectiva** que se utiliza en el análisis de los flujos puede expresarse como:

$$\nu_{\text{efectiva}} = \nu + \nu_t$$

Donde ν_t está relacionada con la **energía cinética turbulenta** k y la tasa de disipación de energía ϵ mediante la relación:

$$\nu_t \sim \frac{k}{\epsilon}$$

- la energía asociada a las fluctuaciones turbulentas por unidad de masa.
- **Tasa de disipación de energía ϵ** : Es la cantidad de energía por unidad de masa que se disipa en un flujo turbulento.

Condiciones de frontera: La viscosidad efectiva dependerá de las propiedades del flujo, especialmente en zonas cercanas a superficies sólidas donde la turbulencia puede ser reducida.

B. Escalas de Kolmogorov

Las **escalas de Kolmogorov** se utilizan para describir las propiedades más pequeñas de un flujo turbulento, ayudando a comprender la disipación de energía. Estas escalas son relevantes para entender los pequeños **Eddies** o remolinos donde se disipa la energía.

- **Escala de Longitud de Kolmogorov (η)**:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4}$$

Esta escala define el tamaño de los remolinos más pequeños en el flujo turbulento.

-
-

- **Escala de Tiempo de Kolmogorov (τ):**

$$\tau = \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2}$$

Esta ecuación determina el tiempo característico de los eddies más pequeños.

Condiciones de frontera: Estas escalas aplican principalmente en regiones con altos gradientes de velocidad y en flujos turbulentos bien desarrollados.

C. Fluctuaciones y Covarianza

En el contexto del método **Eddy covariance**, las **fluctuaciones** en variables como la velocidad del viento o la concentración de gases juegan un papel crucial. La fluctuación de una variable C se define como:

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

Donde:

- C' es la fluctuación respecto al valor medio,
- $\bar{C}$ es el valor medio de la variable.

La **covarianza** entre las fluctuaciones de la velocidad vertical w' y la concentración de gases C' es fundamental para calcular el flujo de gases. Este flujo puede expresarse como:

$$F = \overline{w'C'}$$

Donde:

- F es el flujo vertical del gas,
- w' es la fluctuación de la componente vertical de la velocidad del viento,
- C' es la fluctuación de la concentración de gases.

Condiciones de frontera: La covarianza se calcula a partir de mediciones de viento y concentración de gases a alturas específicas en la atmósfera.

Resultados

El trigo tiene una altura intermedia en comparación con el maíz y la cebada, lo que le permite interactuar con el viento de una manera más dinámica. A esta altura, el viento tiene suficiente turbulencia para mezclarse eficazmente con la atmósfera, pero sin la resistencia excesiva que podría ralentizar este proceso (como ocurre en los otros dos, Figura 2). En cultivos bajos, como la cebada, la turbulencia es menos intensa debido a que el viento no encuentra suficiente resistencia de la vegetación, lo que limita la interacción entre el viento y el cultivo. En cultivos altos, como el maíz, la fricción generada por la mayor cantidad de biomasa y altura reduce la velocidad y la intensidad del viento cerca del suelo, lo que puede disminuir la cantidad de turbulencia disponible para el intercambio de gases.

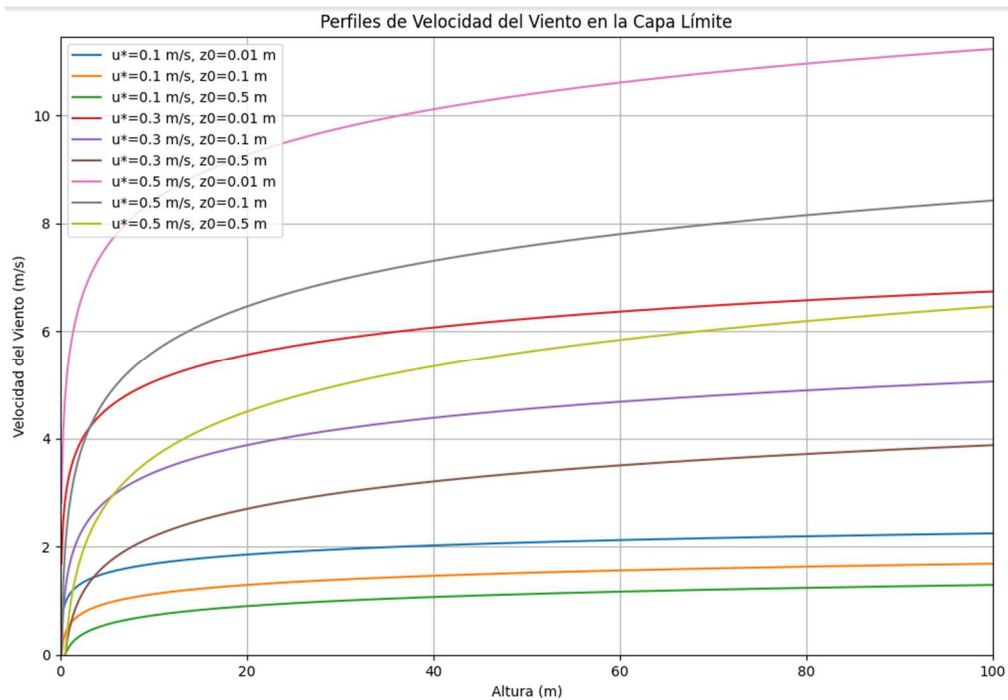


Figura 1. Simulaciones obtenidas con la teoría de capa límite.

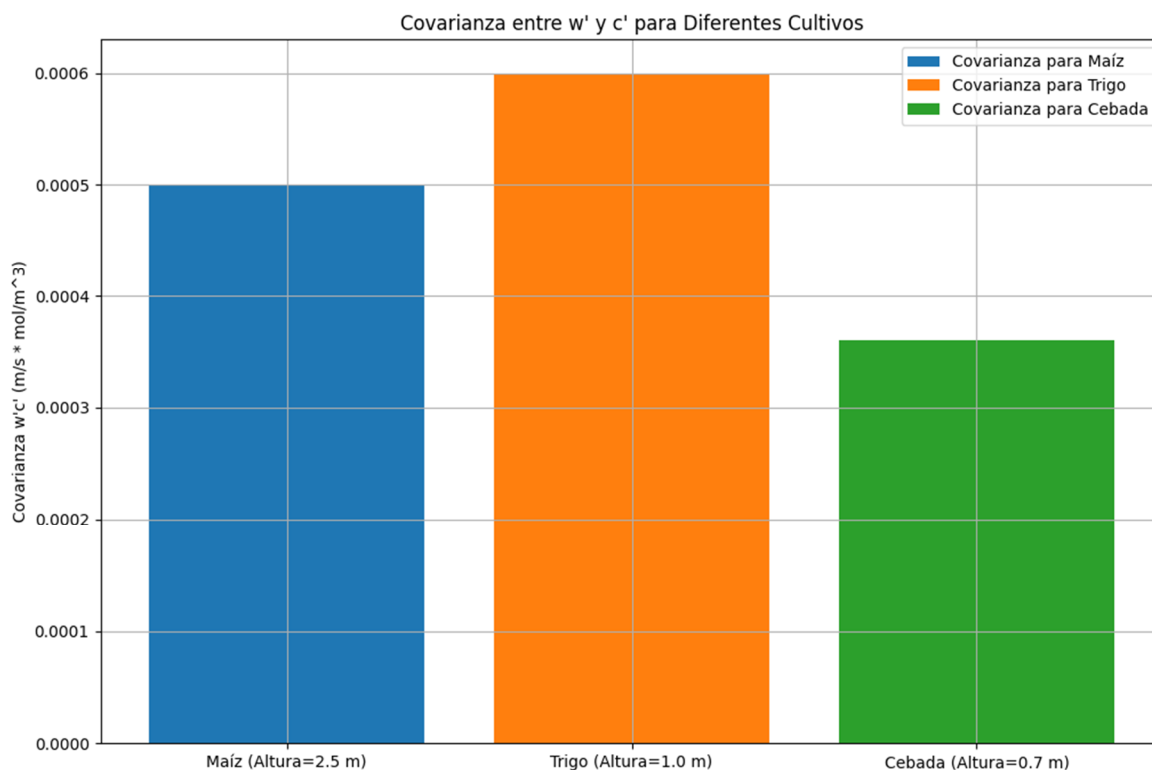


Figura 2. Comparacion de Eddy covariance para tres cultivos con datos sintéticos

Discusión

El principio del método Eddy covariance se basa en la suposición de que las fluctuaciones turbulentas dominan el transporte vertical de gases y calor. A través de la covarianza es posible calcular el flujo neto de gases hacia o desde la superficie. Para derivar este flujo, consideramos el siguiente desarrollo:

La componente vertical de la velocidad del viento w varía debido a los eddies o remolinos atmosféricos, que pueden mover aire cargado de gases hacia arriba o hacia abajo. Este movimiento es registrado mediante anemómetros de alta frecuencia, y las concentraciones de gases, como CO_2 o vapor de agua, también varían con el tiempo y son medidas simultáneamente con sensores especializados.

En aplicaciones de Eddy covariance, las condiciones de frontera son esenciales para garantizar la validez de las mediciones. Estas condiciones incluyen:

-
-
-
-

-
- *Altura de medición:* Los sensores de viento y concentración de gases suelen colocarse a alturas específicas sobre la superficie (entre 2 y 10 metros, dependiendo del sitio), donde la turbulencia es prominente y las mediciones pueden ser representativas del intercambio entre la superficie y la atmósfera.
- *Homogeneidad del terreno:* Se asume que las mediciones se realizan sobre superficies relativamente homogéneas para que los flujos observados sean representativos de un área amplia, en lugar de puntos específicos con características anómalas.
- *Condiciones de equilibrio:* Para que las fluctuaciones y la covarianza sean útiles, se necesita que las condiciones atmosféricas estén en estado estacionario durante el periodo de medición. Esto asegura que el promedio temporal sea representativo de la realidad física del intercambio de gases.

Discusión

En las últimas dos décadas, el método Eddy covariance ha seguido evolucionando, impulsado por avances en la tecnología de sensores y el análisis de datos. Los **analizadores de gases basados en láseres de diodo**, por ejemplo, han permitido medir con mayor precisión gases como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), dos potentes gases de efecto invernadero. Además, la incorporación de **sensores remotos**, como los sistemas LiDAR y torres de medición más sofisticadas, ha permitido combinar el método Eddy covariance con otros enfoques para estudiar la dinámica atmosférica en diferentes escalas. Esto ha mejorado nuestra capacidad para integrar mediciones locales con observaciones satelitales globales.

En términos de análisis de datos, las herramientas de **aprendizaje automático** y los avances en la computación en la nube han facilitado el procesamiento de grandes volúmenes de datos EC, permitiendo el desarrollo de modelos predictivos más precisos y estudios comparativos a gran escala. El método Eddy covariance ha recorrido un largo camino desde sus orígenes en la teoría de la turbulencia hasta convertirse en una de las herramientas más importantes para medir los flujos de gases y energía en la atmósfera. Su historia está marcada por hitos tecnológicos y científicos que han permitido a los investigadores obtener una visión más detallada de los procesos ecológicos y atmosféricos. Hoy en día, sigue siendo una técnica clave en el estudio del cambio climático y la gestión de ecosistemas, con nuevas fronteras por explorar gracias a la continua evolución de la instrumentación y el análisis de datos.

Conclusión

El uso de las fluctuaciones y la covarianza en el método Eddy covariance proporciona una herramienta poderosa para el estudio de los flujos de gases y energía en la atmósfera. A través de la covarianza entre la velocidad vertical del

viento y las concentraciones de gases, se puede calcular con precisión el transporte de masa y energía, mejorando la comprensión de los ciclos biogeoquímicos y los procesos climáticos. Este método sigue siendo esencial para i

nvestigaciones relacionadas con el cambio climático, el balance de carbono y la ecología de los ecosistemas.

Referencias Bibliográficas

McMillen, R. T. (1988). *An overview of recent developments in the Eddy covariance method*. Boundary-Layer Meteorology, 43(1), 3-24.

Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., (2000). *Estimates of the annual net carbon and water exchanges of a mixed temperate forest in the Vosges mountains*. Agricultural and Forest Meteorology, 103(3), 179-195.

Katul, G. G., et al. (2012). *The impact of surface heterogeneity on Eddy covariance measurements: A review*. Boundary-Layer Meteorology, 145(2), 217-233.

Baldocchi, D. (2003). "Assessing the Eddy Covariance Technique for Evaluating Carbon Dioxide Exchange Rates of Ecosystems: Past, Present and Future." *Global Change Biology*.

Aubinet, M., Vesala, T., & Papale, D. (Eds.). (2012). *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer Science & Business Media.

Wilson, K. B., Baldocchi, D. D., & Hanson, P. J. (2000). "Spatial and seasonal variability of photosynthesis and respiration in a deciduous forest." *Agricultural and Forest Meteorology*.