

EFICIENCIA DE LOS TRANSPORTES TURBULENTOS DE CO₂ Y HUMEDAD EN UNA PASTURA DE LA PAMPA HÚMEDA

Natalia Tonti¹, Lucia Curto^{1,2}, Nahuel Bautista^{1,2}, Antonella Burek¹, Rodrigo Merino^{1,2},
Mauro Covi¹, María I. Gassmann^{1,2}
ntonti@at.fcen.uba.ar

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Palabras clave: capa límite atmosférica, estabilidad atmosférica, flujos turbulentos, pasturas.

1) INTRODUCCIÓN

La Capa Límite Atmosférica (CLA) es la porción de atmósfera más cercana a la superficie que responde a los forzantes de la misma. Es una capa que se caracteriza por su estado turbulento, que en la atmósfera se genera por la interacción entre el aire y la superficie. A diferencia de la percepción general la turbulencia no es totalmente azarosa, sino que puede organizarse en torbellinos o eddies denominados “estructuras coherentes” (CS, por sus siglas en inglés). Estas estructuras logran aportar significativamente, y de forma eficiente, al transporte de cantidad de movimiento, calor y masa a través de movimientos verticales turbulentos (Li y Bou-Zeid, 2011). Las CS presentan distintas topologías de acuerdo a las condiciones de estabilidad atmosférica. En condiciones neutrales prevalecen las CS tipo “hairpin vortices”, con disposición más bien extendida en la horizontal, que transportan en conjunto principalmente cantidad de movimiento y escalares (Curto et al., 2022). En condiciones inestables se desarrollan las “plumas térmicas”, eficientes en el transporte turbulento de calor y otros escalares. En condiciones estables la turbulencia se ve inhibida, disminuyendo con ella, las CS asociadas, por lo que el transporte turbulento se vuelve poco eficiente (Zeitune, 2024).

Los flujos de dióxido de carbono (CO₂) y de humedad específica (q) entre la biósfera y la atmósfera ocurren principalmente a través de mecanismos turbulentos dentro de la CLA. El CO₂ es un gas de efecto invernadero que desempeña un papel significativo en la acumulación de calor dentro de la atmósfera terrestre. El vapor de agua es también un gas de efecto invernadero, y crucial en el ciclo del agua, aportado a través de los flujos de humedad desde la superficie. En la Argentina el sector agrícola-ganadero es responsable de gran parte de las emisiones de CO₂ (Hiraishi et al., 2014). Resulta entonces relevante estudiar el rol de los cultivos como fuente o sumidero de CO₂ y de humedad, especialmente en zonas rurales productivas.

En este trabajo se presenta un análisis de los flujos turbulentos de CO₂ y de humedad transportados por CS sobre un cultivo de alfalfa. Se analizan mediciones micrometeorológicas y se caracterizan las eficiencias de los transportes turbulentos en distintas condiciones de estabilidad para distintos momentos del año.

2) METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de flujo turbulento obtenidos con la metodología de las covarianzas turbulentas (Mauder y Foken, 2015), calculados en promedios de media hora. Se analizaron las eficiencias de los transportes turbulentos, obtenidas como: $r_{wx} = \frac{w'x'}{\sigma_w \sigma_x}$, siendo $w'x'$ el

flujo turbulento de una variable x , y σ_w y σ_x los desvíos estándar de las variables velocidad vertical y la variable x . La variable x representa a la temperatura (T), la humedad específica (q) o la concentración de CO_2 (c). Se calcularon las eficiencias de los transportes turbulentos de de temperatura ($\overline{w'T'}$), de humedad ($\overline{w'q'}$) y de CO_2 ($\overline{w'c'}$). Los valores negativos de los flujos representan sumideros para la atmósfera, mientras que aquellos con valores positivos representan fuentes. Se seleccionaron los datos de dos meses como casos de estudio. Se consideraron los datos de un mes de verano (noviembre de 2024) y uno de invierno (junio de 2024). También se cuenta con datos de humedad de suelo medidos con frecuencia mensual, correspondientes a los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

Los flujos se estudiaron por separado según la estabilidad de la atmósfera, determinada por el parámetro de estabilidad (z/L), donde L es la longitud de Obukhov. La estabilidad se clasificó en condiciones fuertemente inestables ($z/L \leq -0.5$; FI), inestables ($-0.5 < z/L \leq -0.005$; I), neutrales ($-0.005 < z/L \leq 0.005$; N), estables ($0.5 < z/L \leq 0.5$; E) y fuertemente estables ($0.5 < z/L$; FI) (Curto et al., 2022).

3) RESULTADOS

Las condiciones FI solamente se dan en noviembre, asociado a un mes más cálido (de la primavera tardía). Si bien son pocas (se dan solo 6 veces), en junio no se alcanzan dichas condiciones de estabilidad. A su vez, condiciones FE no se registraron, probablemente debido a que no satisfacen los controles de calidad de los datos (Figura 1).

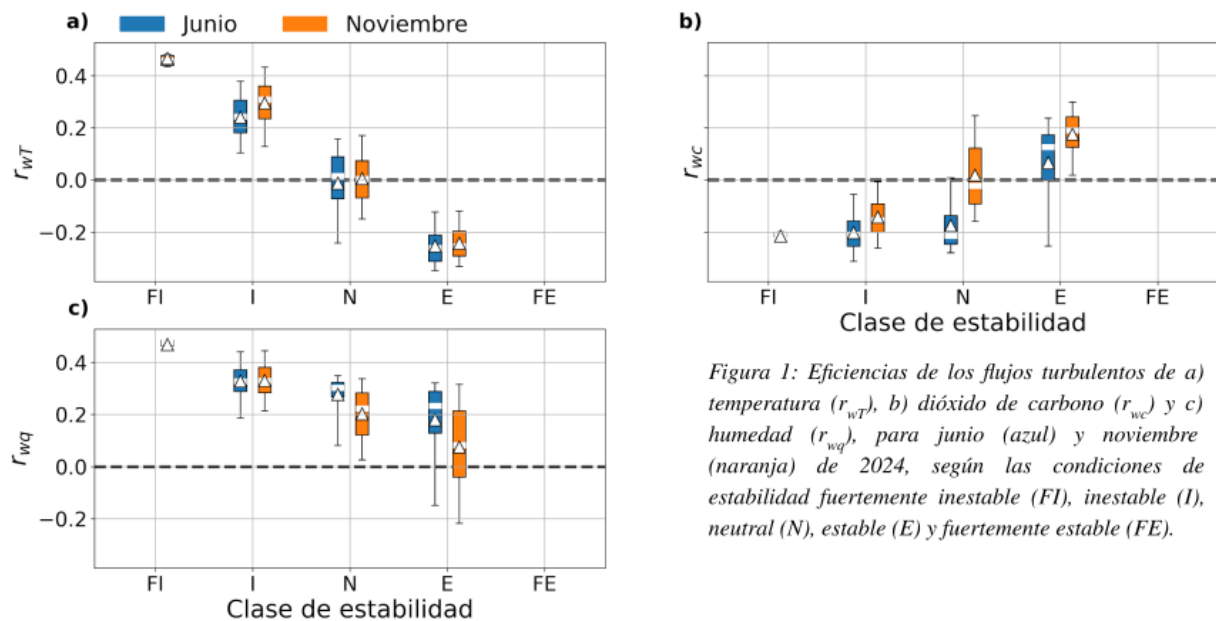


Figura 1: Eficiencias de los flujos turbulentos de a) temperatura (r_{wT}), b) dióxido de carbono (r_{wC}) y c) humedad (r_{wq}), para junio (azul) y noviembre (naranja) de 2024, según las condiciones de estabilidad fuertemente inestable (FI), inestable (I), neutral (N), estable (E) y fuertemente estable (FE).

A medida que aumenta la inestabilidad, aumenta la eficiencia del transporte turbulento de temperatura y CO_2 . En condiciones N los valores del transporte son nulos. En condiciones E invierten el signo, y vuelven a mostrar valores distintos de cero. Los flujos de temperatura son positivos en condiciones FI e I debido a que se corresponden a condiciones mayormente diurnas, con la superficie actuando como fuente de calor. Las condiciones E representan condiciones mayoritariamente nocturnas, con sumidero de flujo de temperatura. Las eficiencias de flujo de temperatura resultan mayores en noviembre en condiciones I y FI, mientras que son mayores en valor absoluto en junio para condiciones E.

La eficiencia de flujo de CO₂ en condiciones diurnas es negativa debido a que la superficie vegetal actúa como sumidero, asociada a la fotosíntesis. De noche la superficie es fuente de CO₂ por la respiración, y la eficiencia positiva. Los comportamientos son contrarios para las eficiencias de flujos de CO₂ respecto de los de temperatura en valor absoluto.

Las eficiencias de transporte de humedad presentan un comportamiento un poco distintos a los otros flujos. Siempre resultan positivos, siendo la superficie una fuente de humedad. Los casos de flujo negativo son escasos, y se dan en condiciones E, especialmente en el mes de invierno (junio). Las eficiencias de transporte resultan más intensas en todas las condiciones de estabilidad en el mes de junio, respecto del mes de noviembre. Durante el invierno el suelo estuvo más húmedo, siendo su contenido de agua de 461 mm, mientras que en noviembre ese valor fue de 268 mm. La mayor disponibilidad de humedad del suelo influyó los flujos turbulentos de humedad observados en la atmósfera, generando una mayor eficiencia de transporte.

4) CONCLUSIONES

La estabilidad atmosférica fue el principal modulador de las diferencias en el comportamiento y tipo de CS de la turbulencia. En condiciones más inestables predominan las “plumas térmicas”, favoreciendo la eficiencia de los transportes turbulentos, en especial en el mes más cálido. En condiciones más neutrales dominan los “hairpin vortices”, reduciendo la eficiencia de los transportes. En condiciones estables la turbulencia se ve inhibida, no se organizan las estructuras coherentes, y los transportes son menos eficientes. A su vez los transportes de las distintas propiedades responden a los forzantes de superficie, con influencia de la superficie vegetada, que genera una fuente de humedad continua, y un sumidero de CO₂ en condiciones diurnas.

REFERENCIAS

- Curto, L., Gassmann, M. I., Covi, M., Tonti, N. E., 2022:** Study of turbulence behavior above two different crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109012. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109012
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T., 2014:** 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland.
- Li, D., Bou-Zeid, E., 2011:** Coherent structures and the dissimilarity of turbulent transport of momentum and scalars in the unstable atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 140, 2, 243-262. DOI: 10.1007/s10546-011-9613-5
- Mauder, M., Foken, T. 2015.** Eddy-Covariance Software TK3. In *Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update)* (p. 67). University of Bayreuth. DOI: 10.5281/zenodo.20349. Accedido el 18-05-2025
- Zeitune, M. 2024.** Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera “Transporte de CO₂ por las estructuras coherentes de la turbulencia en un cultivo en la provincia de Buenos Aires”. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, p.57.