

EVAPOTRANSPIRACIÓN VS NUBOSIDAD INTERMITENTE Y TURBULENCIA VERTICAL EN UN AMBIENTE URBANO

Adalberto TEJEDA-MARTÍNEZ, Diego de Jesús VILLEGAS-DE LA PORTILLA,
Juan Diego LÓPEZ-REYES

*Grupo de Climatología Aplicada de la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas,
Universidad Veracruzana. Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, México.*

atejeda@uv.mx, atejeda.martinez@gmail.com

RESUMEN

El centro de la vertiente mexicana del Golfo de México es montañoso. En el semestre de verano lo afectan los vientos alisios y en el invierno las masas de aire frío. En periodos de transición la brisa marina y la brisa terral se alternan en el ciclo diario, por lo que en los tres periodos son frecuentes los días parcialmente nublados (42%) con nubes intermitentes. En un sitio urbano (19,54°N; 96,93°W; 1466 msnm), a 30 m de altura, se colocaron dos sensores de radiación solar entrante (onda corta S_{\downarrow} y onda larga L_{\downarrow}), dos de radiación saliente (onda corta S_{\uparrow} y larga L_{\uparrow}), más un higrómetro de kriptón acoplado a un anemómetro sónico. Entre febrero y abril de 2018 se hicieron tres mediciones por minuto del balance radiativo y del flujo de calor latente, este último por el método de covarianzas turbulentas. La nubosidad intermitente se infirió de las rachas en la radiación entrante. Se encontró que la variabilidad de la evapotranspiración responde más a la turbulencia mecánica que a la intermitencia de la nubosidad.

Palabras clave: evapotranspiración, balance radiativo, nubosidad intermitente, turbulencia mecánica.

ABSTRACT

The central Mexican side of the Gulf of Mexico is a mountainous area. In summer is affected by the trade winds, and in winter there are invasions of cold air masses. In transitional periods, the sea/land breezes alternate during the diurnal cycle. For the three periods partially cloudy days are frequent (42%) with intermittent passage of clouds. In an urban site (19°,54°N; 96,93°W; 1466 masl), placing two incoming solar radiation sensors (short S_{\downarrow} and long wave L_{\downarrow}) and two of outgoing radiation (short S_{\uparrow} and long L_{\uparrow} wave) at 30 m high; a krypton hygrometer associated with a sonic anemometer allowed calculate the actual evapotranspiration by the eddy covariance method. Three measurements per minute were made from February to April 2018. The result is that the main cause of evapotranspiration variability is the mechanical turbulence rather than the solar radiation streaks.

Key words: evapotranspiration, radiation budget, intermittent cloudiness, mechanical turbulence.

1. INTRODUCCIÓN

Los balances radiativo y energético en la interfaz suelo/atmósfera en condiciones de cielos despejados siguen curvas continuas, con irregularidades ante la presencia de nubes, pero ¿qué sucede cuando hay nubosidad intermitente?, ¿cómo se afecta la evapotranspiración?, ¿con qué retraso se reflejan los cambios en la evapotranspiración respecto de las variaciones en la radiación solar entrante?

Las preguntas anteriores son relevantes porque las fluctuaciones en los flujos radiativos en superficie, y sus correspondientes condiciones del cielo, juegan un papel importante para comprender y simular las características dinámicas del balance de energía en superficie; además, la calidad temporal de la radiación entrante en superficie es un descriptor esencial del medioambiente superficial (Kivalov y Fitzjarrald, 2018). Como señalan los mismos autores y Barradas et al., (1994), para las cubiertas vegetales debe considerarse que el tiempo de respuesta de los estomas está en el orden de pocos minutos, en muchas ocasiones comparable a los periodos de intermitencia nubosa de un día parcialmente nublado.

Esas preguntas también son relevantes para el aprovechamiento de la energía solar, pues las fluctuaciones de la luz incidente, pueden significar desafíos importantes en la producción fotovoltaica (véase por ejemplo, Lappalainen y Valkealahti, 2015, 2016).

Kivalov y Fitzjarrald (2018) cuantificaron y modelaron el efecto de las sombras de las nubes en la irradiación superficial de un bosque tropical (Tapajós National Forest, Pará, Brasil: 2,86°S, 54,96°W) y de uno de latitudes medias (Harvard Forest, EUA; 42,53°N, 72,17°W) a través de mediciones a 10 Hz de temperatura del aire, radiación de onda corta y de onda larga, velocidad del viento, concentraciones de CO₂ y humedad atmosférica, en torres a una altura de 64 m y 30 m, respectivamente. Vincularon estadísticamente la duración de los periodos de luz y sombra por nubosidad con los informes meteorológicos convencionales, y así encontraron una relación entre la fracción del cielo cubierto por nubes dispersas o agrupadas y el tipo de nubes presentes, con los patrones de la intermitencia de *sombra a luz* (pico a pico, pico a suave, suave a pico, o suave a suave) de la radiación entrante en la superficie. Aplicar los trabajos de Gu et al. (2001), Assunção et al. (2007), de Rodts et al. (2003) y de Berg y Kassianov (2007) es relativamente complicado pues requieren datos de la velocidad y la altitud de las nubes. En el presente trabajo se siguió un procedimiento más sencillo, ensayado previamente por López-Reyes y Villegas-De la Portilla (2018). Parte de la hipótesis de que la nubosidad está asociada con variaciones del balance de radiación en la superficie, el viento horizontal y vertical, la temperatura y la humedad del aire, entre otras. Por lo anterior, se planteó el objetivo de evaluar los efectos en la evapotranspiración de las variaciones del balance radiativo superficial por nubosidad intermitente.

El flujo de vapor de la superficie hacia la atmósfera incluye tanto la evaporación de agua líquida como la sublimación de hielo (ausente en la zona de estudio) desde los cuerpos de agua o desde el suelo, y la transpiración de vegetales y animales, a lo que en conjunto se le llama evapotranspiración. Puede ser afectada por el viento, la radiación solar, la humedad y la temperatura del suelo y de la atmósfera. Cuantificar la evapotranspiración es importante para la evaluación de la producción vegetal o para la planificación y gestión de los recursos hídricos.

El instrumento más común para medir la evapotranspiración es el lisímetro que consiste en un trozo de suelo cubierto de vegetación, cuyos cambios de peso se deben a la recepción de precipitación menos la evapotranspiración. Otra es la técnica de covarianza turbulenta (*eddy covariance*), la cual parte de la covarianza entre el contenido de humedad en el aire y la velocidad vertical del viento, medidos a altas frecuencias (varias veces por segundo). Esta última es una forma directa de calcular el flujo vertical turbulento de calor latente y a partir de él evaluar la evapotranspiración durante cierto periodo (Moene y Van Dame, 2014).

Las mediciones para esta contribución se efectuaron en la Facultad de Economía de la Universidad Veracruzana, en México, a 19,54°N y 96,63°W (figura 1) en la región montañosa central del estado de Veracruz, en la ciudad de Xalapa, a una altitud de 1466 msnm. Se midieron, a razón de tres veces por minuto entre febrero y abril de 2018, flujos de radiación solar entrante (onda corta $S\downarrow$ y onda larga $L\downarrow$) y de radiación saliente (onda corta $S\uparrow$ y larga $L\uparrow$), así como flujos verticales turbulentos de calor latente, de los cuales se derivaron los valores de la evapotranspiración. Los instrumentos se instalaron en una torre a 30 metros de altura sobre el nivel de la calle. La zona de estudio presenta un clima templado húmedo. Enero es el mes más frío con una temperatura media de 15°C (con mínimas que llegan a estar por debajo de los 10°C) y el más cálido es mayo con 21°C en promedio (con máximas que ocasionalmente superan los 32°C). La precipitación media anual es de 1500 mm, pero en el semestre mayo-octubre se acumula casi el 75% de la lluvia. En 500 m alrededor del edificio de la Facultad de Economía hay vegetación (césped con arbustos y algunos árboles con alturas hasta de 35 m) dispersa entre los espacios construidos como avenidas, casas-habitación y edificios escolares de dos a tres plantas con muros y azoteas de concreto y piedra, con predominancia de colores grisáceos salvo algunos techos cubiertos de impermeabilizante rojizo o armados de chapa metálica. A partir del trabajo de Stewart y Oke (2012), se estima que la zona climática local está entre la LCZ 6 (*open lowrise*) y LZC 7 (*lightweight lowrise*), con una altura de rugosidad aproximada de 0.5 m.

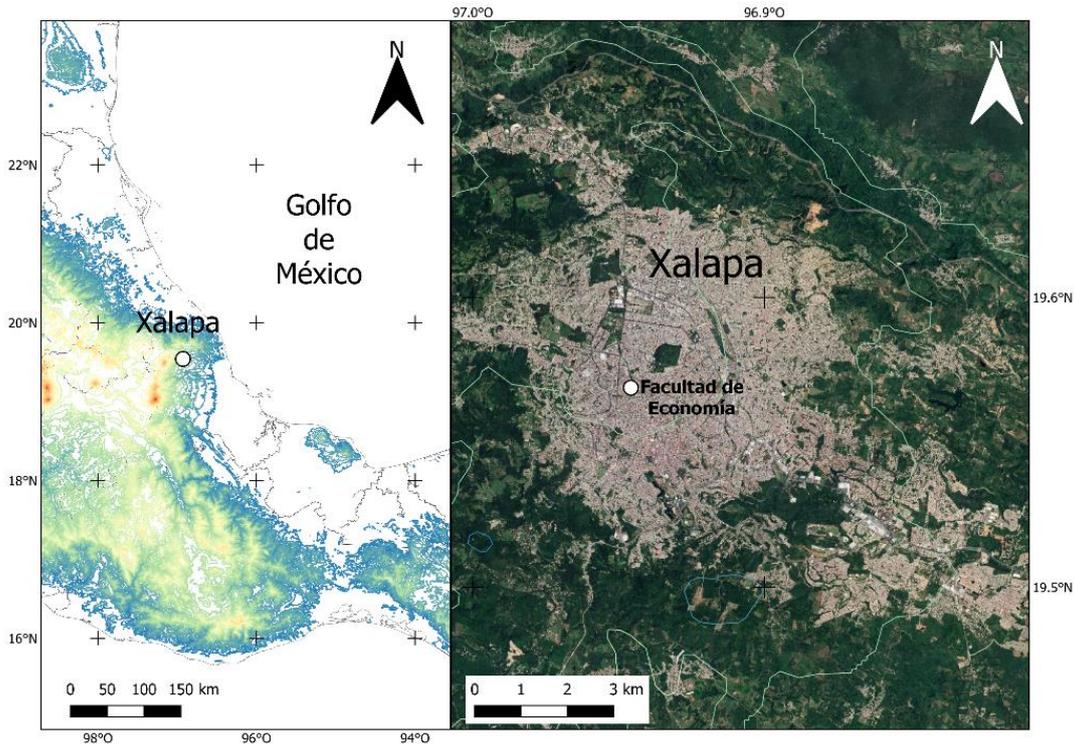


Fig. 1: Ubicación de la zona de estudio. Editada en QGIS 3.16.16 a partir de http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/maps/geo/destdv250k_2gw.zip http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/cni250kgw.xml?_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&indent%20=%20no

2. MÉTODOS

Los instrumentos usados, todos de la marca Campbell Scientific, fueron: un radiómetro modelo NR01, que incluye dos pares de sensores, un par con la cara hacia arriba y el otro hacia abajo; cada par compuesto por un piranómetro tipo SR01, para radiación de onda corta entrante (S_{\downarrow}) y saliente (S_{\uparrow}) en longitudes de onda de 300 a 2800 nm, y un pirgeómetro tipo IR01, para radiación de onda larga entrante (L_{\downarrow}) y saliente (L_{\uparrow}) en longitudes de 4500 a 50000 nm. La radiación neta (Q^*) se obtuvo como:

$$Q^* = S_{\downarrow} - S_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad \text{Ec. 1,}$$

Además, se utilizó un higrómetro de kriptón KH20 que mide las fluctuaciones de la densidad de vapor de agua o humedad absoluta ($g\ m^{-3}$), acoplado al anemómetro sónico CSAT3, que mide la velocidad del viento en tres dimensiones (Campbell-Scientific Inc, 2014a, 2014b, 2014c). Con estos dos últimos sensores se hicieron mediciones del flujo turbulento vertical de calor latente (Q_E) usando la técnica de covarianza turbulenta:

$$Q_E = \lambda cov(w, \rho_w) \quad \text{Ec. 2,}$$

donde w es la velocidad del viento en la vertical en m s^{-1} , λ es el calor latente de evaporación (2500 kJ kg^{-1}), ρ_w es la humedad absoluta en g m^{-3} . Nótese que la $cov(w, \rho_w)$ con valor de 1, equivale a una evapotranspiración (ET) de $10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$, o 10^{-3} litros $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Los flujos de radiación (W m^{-2}) de onda corta y de onda larga entrantes y la ET , fueron generados cada 20 segundos —pues no es posible una frecuencia mayor dado el tiempo de respuesta de los sensores— durante 44 días entre febrero y abril de 2018, pero solo se usaron los datos de las 10 a 17 horas locales, cuando la radiación neta resultaba claramente positiva, es decir, durante el periodo radiativo diurno. El higrómetro y el anemómetro tomaron muestras a 10 Hz, de modo que la Ec. 2 se aplicó a muestras de 200 parejas (w, ρ_w) para obtener datos cada 20 segundos y acoplarlos con los datos de radiación.

La intermitencia de la nubosidad se definió mediante el conteo de las rachas de radiación solar entrante y radiación neta, usando el siguiente procedimiento. Sea Y_i la variable en cuestión en el instante i , Y_{i+1} la misma variable en el instante $i+1$ (20 segundos después), e $Y_j = Y_{i+1} - Y_i$; entonces se puede presentar cualquiera de las cuatro situaciones siguientes (donde $Z_j = 0$ significa sin racha, es decir, sin intermitencia nubosa, y $Z_j = 1$ significa con intermitencia):

$$\begin{aligned} Y_j > 0, Y_{j+1} > 0, Z_j &= 0, \text{ sin racha} \\ Y_j < 0, Y_{j+1} < 0, Z_j &= 0, \text{ sin racha} \\ Y_j < 0, Y_{j+1} > 0, Z_j &= 1, \text{ con racha} \\ Y_j > 0, Y_{j+1} < 0, Z_j &= 1, \text{ con racha} \end{aligned}$$

3. RESULTADOS

La radiación de onda corta entrante varió a lo largo del experimento como se ve en la figura 2. Sus estadísticas básicas, junto con el resto de las variables, se incluyen en la tabla 1. Las figuras 3 y 4 muestran, respectivamente, un ejemplo de día con radiación entrante intermitente y con cielo prácticamente despejado.

La tabla 2 contiene las correlaciones lineales entre la evapotranspiración y las demás variables; como se ve las correlaciones son extremadamente bajas. Las cantidades de rachas se presentan en la tabla 3, tanto para el periodo completo como para los ejemplos de los días 23 (con nubosidad intermitente) y 28 (cielo despejado) de febrero de 2018; en la evapotranspiración ocurrió una cantidad mayor de rachas.

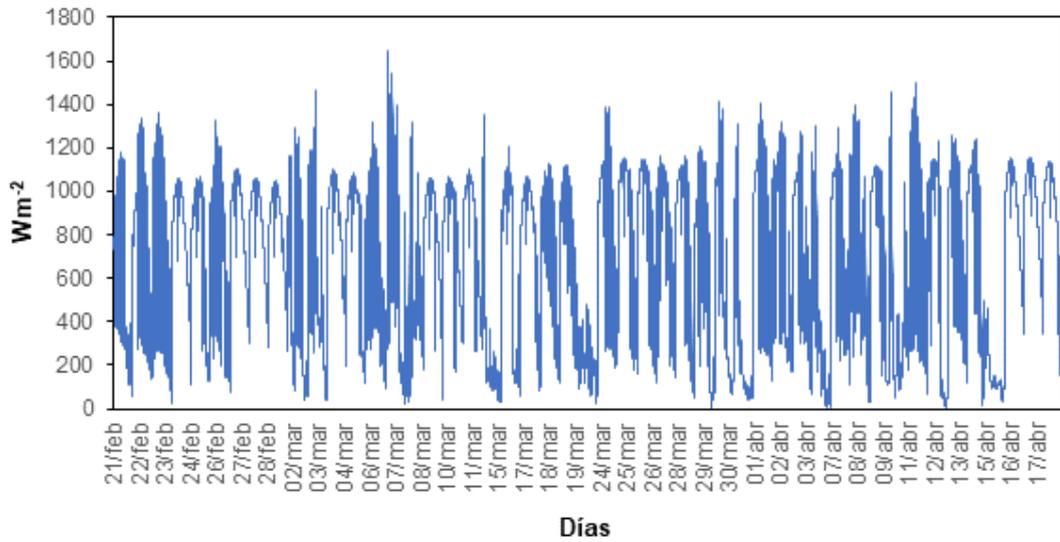


Fig. 2: Serie de tiempo de la radiación de onda corta entrante (S_{\downarrow}) durante 44 días de mediciones.

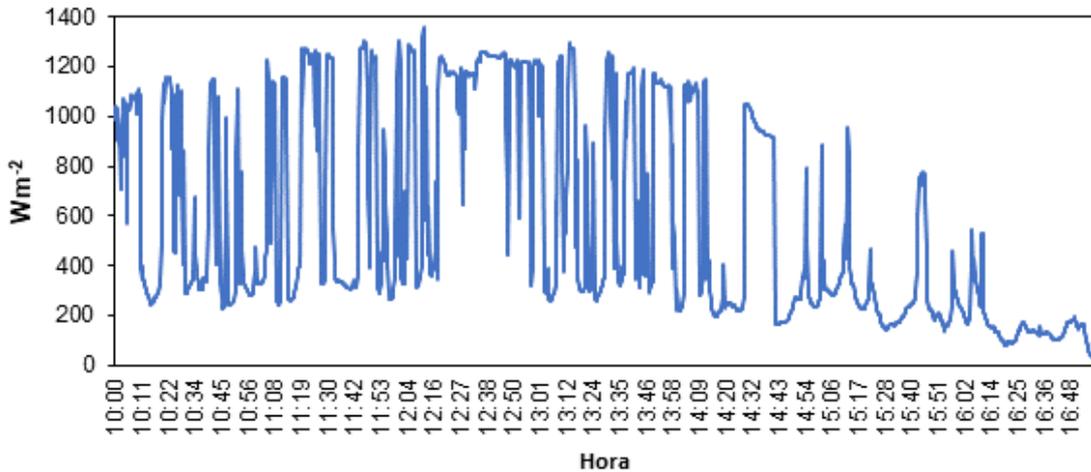


Fig. 3: Radiación de onda corta entrante (S_{\downarrow}) durante el 23 de febrero de 2018.

| | ET | S_{\downarrow} | S_{\uparrow} | L_{\downarrow} | L_{\uparrow} | Q^* | w | v |
|---------------------|--------|------------------|----------------|------------------|----------------|-------|-------|------|
| Media | 0,0029 | 697 | 101 | -119 | 77 | 840 | -0,16 | 2,45 |
| Desviación estándar | 0,0032 | 358 | 51 | 52 | 30 | 425 | 0,47 | 1,17 |
| Mínimo | 0,0000 | 19 | 3 | 195 | 8 | 12 | -2,05 | 0,11 |
| Máximo | 0,0222 | 1418 | 202 | 10 | 135 | 1590 | 2,12 | 8,28 |

Tabla 1: Estadísticas descriptivas para todo el periodo. ET es la evapotranspiración (mm día^{-1}), S_{\downarrow} es la radiación de onda corta entrante y S_{\uparrow} la saliente; L_{\downarrow} es la radiación de onda larga entrante y L_{\uparrow} la saliente, Q^* es la radiación neta (Ec. 1, en W m^{-2}), w el viento vertical y v el horizontal en m s^{-1} .

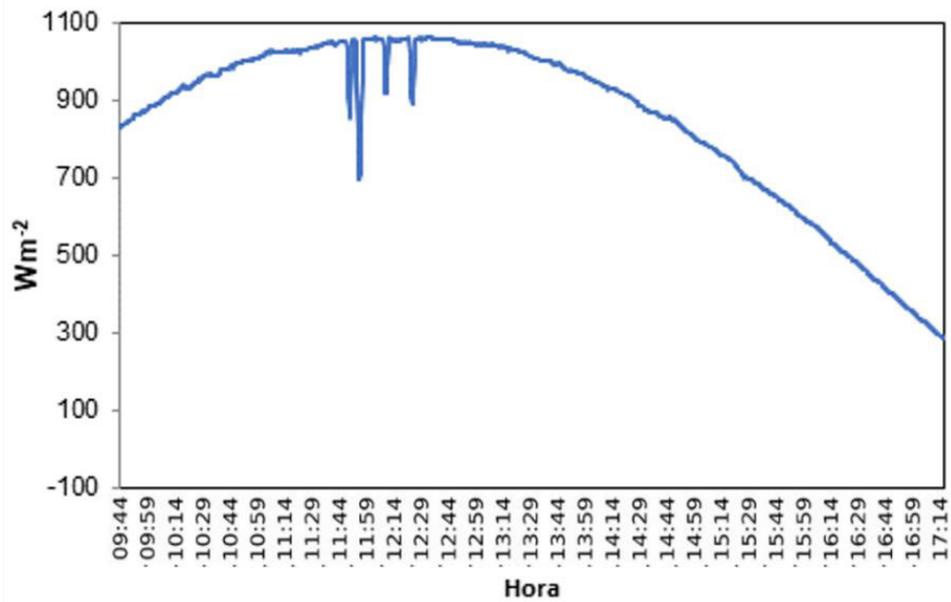


Fig. 4: Radiación de onda corta entrante (S_{\downarrow}) el 28 de febrero de 2018.

| S_{\downarrow} | S_{\uparrow} | L_{\downarrow} | L_{\uparrow} | Q^* | w | v |
|------------------|----------------|------------------|----------------|-------|------|------|
| 0,05 | 0,05 | -0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |

Tabla 2: Correlaciones lineales de las variables contra la ET. Los valores se mantienen en el mismo orden aun retrasando los datos de ET 1, 2 o 3 minutos.

| | ET | S_{\downarrow} | S_{\uparrow} | L_{\downarrow} | L_{\uparrow} | Q^* | w | v |
|--|----|------------------|----------------|------------------|----------------|-------|-----|-----|
| Todo el periodo (n=36.387) | 65 | 30 | 39 | 48 | 46 | 36 | 59 | 52 |
| Febrero 23, nubosidad intermitente (n=721) | 65 | 34 | 37 | 39 | 36 | 38 | 59 | 52 |
| Febrero 28, despejado (n=767) | 64 | 36 | 43 | 54 | 46 | 41 | 58 | 49 |

Tabla 3: Porcentajes de rachas en las diferentes variables.

| | ET | S_{\downarrow} | S_{\uparrow} | L_{\downarrow} | L_{\uparrow} | Q^* | w | v |
|------------------|-----|------------------|----------------|------------------|----------------|-------|-----|-----|
| ET | 100 | 47 | 46 | 49 | 49 | 45 | 52 | 51 |
| S_{\downarrow} | | 100 | 68 | 53 | 52 | 81 | 46 | 49 |
| S_{\uparrow} | | | 100 | 54 | 53 | 69 | 49 | 50 |
| L_{\downarrow} | | | | 100 | 57 | 56 | 50 | 50 |
| L_{\uparrow} | | | | | 100 | 55 | 50 | 50 |
| Q^* | | | | | | 100 | 48 | 50 |
| w | | | | | | | 100 | 56 |
| v | | | | | | | | 100 |

Tabla 4: Porcentajes de coincidencias entre rachas de diversas variables para todo el periodo (n=36.387).

Por último, los porcentajes de coincidencias entre las rachas de la evapotranspiración y las diversas variables se incluyen en la tabla 4 (para todo el periodo), tabla 5 (febrero 23) y tabla 6 (febrero 28).

| | <i>ET</i> | <i>S</i> ↓ | <i>S</i> ↑ | <i>L</i> ↓ | <i>L</i> ↑ | <i>Q</i> * | <i>w</i> | <i>v</i> |
|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| ET | 100 | 45 | 47 | 49 | 46 | 45 | 51 | 49 |
| <i>S</i> ↓ | | 100 | 72 | 56 | 52 | 81 | 47 | 47 |
| <i>S</i> ↑ | | | 100 | 56 | 54 | 75 | 47 | 48 |
| <i>L</i> ↓ | | | | 100 | 57 | 59 | 48 | 50 |
| <i>L</i> ↑ | | | | | 100 | 52 | 49 | 50 |
| <i>Q</i> * | | | | | | 100 | 47 | 49 |
| <i>w</i> | | | | | | | 100 | 55 |
| <i>v</i> | | | | | | | | 100 |

Tabla 5: Porcentaje de coincidencias de rachas entre las diversas variables para un día con nubosidad intermitente (23 de febrero de 2018). $n = 721$.

| | <i>ET</i> | <i>S</i> ↓ | <i>S</i> ↑ | <i>L</i> ↓ | <i>L</i> ↑ | <i>Q</i> * | <i>w</i> | <i>v</i> |
|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| ET | 100 | 45 | 49 | 53 | 47 | 45 | 50 | 50 |
| <i>S</i> ↓ | | 100 | 63 | 51 | 52 | 78 | 47 | 50 |
| <i>S</i> ↑ | | | 100 | 52 | 51 | 64 | 50 | 50 |
| <i>L</i> ↓ | | | | 100 | 61 | 57 | 55 | 51 |
| <i>L</i> ↑ | | | | | 100 | 54 | 56 | 51 |
| <i>Q</i> * | | | | | | 100 | 50 | 50 |
| <i>w</i> | | | | | | | 100 | 53 |
| <i>v</i> | | | | | | | | 100 |

Tabla 6: Porcentaje de coincidencias de rachas entre las diversas variables para un día con cielo despejado (28 de febrero de 2018). $n = 767$.

4. DISCUSIÓN

Las correlaciones lineales entre la evapotranspiración y el resto de las variables son demasiado bajas (Tabla 2), aun con retrasos de uno a tres minutos de la primera respecto de las segundas, por lo que se buscó encontrar una relación a través de las frecuencias de rachas. Tanto para el periodo de mediciones completo como para ejemplos de días con nubosidad intermitente o con cielos despejados, las rachas presentan frecuencias relativas similares, excepto para la *ET* que oscila a mayor frecuencia que las demás variables. Es decir, que las componentes radiativas y el viento tienen un comportamiento turbulento casi sin importar las condiciones del cielo (Tabla 3).

Para el periodo completo y para el día despejado (Tablas 4 y 6) las coincidencias de rachas rondan el 50% entre la evapotranspiración y las demás variables; o entre el

viento (vertical u horizontal) y las demás variables; solo entre las componentes radiativas entre sí se alcanzan valores del 68% o mayores. Para el día con nubosidad intermitente (Tabla 5) esos valores son ligeramente menores, lo que significa un comportamiento más estocástico.

El hecho de que las coincidencias de rachas entre las componentes radiativas sean superiores a los porcentajes alcanzados entre las radiaciones y las otras variables, puede deberse a que la superficie por debajo de los sensores, como se anotó al final de la sección 2, no tiene vegetación abundante, es medianamente rugosa y, por tanto, sus oscilaciones no están dominadas por el calentamiento radiativo.

Finalmente, el procedimiento para el conteo de las rachas propuesto en este trabajo resultó útil para el análisis del comportamiento de la evapotranspiración, y su comparación con el balance radiativo y sus componentes ante la presencia de nubosidad intermitente.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución es parte del proyecto *Interacción superficie/atmósfera en la zona montañosa central de la vertiente del Golfo de México: observaciones y modelación a alta resolución* (CONACyT-CB-2012-01-183040). Los autores agradecen las sugerencias y apoyo gráfico de Carlo A. Domínguez Eusebio, Adrián Álvarez Pérez, Omar Castro Díaz y René Gómez Díaz.

REFERENCIAS

- Assunção, H.F., Escobedo, J.F., Oliveira, A.P. (2007). A new algorithm to estimate sky condition based on 5 min-averaged values of clearness index and relative optical air mass. *Theor Appl Climatol*, 90:235–248. doi:[10.1007/s00704-006-0283-z](https://doi.org/10.1007/s00704-006-0283-z)
- Barradas, V.L., Jones H.G. y Clark, J.A. (1994). Stomatal responses to change irradiance in *Phaseolus vulgaris*. *L. J. Exp Bot*, 45:931–936. doi:<https://doi.org/10.1093/jxb/45.7.931>
- Berg, L.K y Kassianov, E. I. (2007). Temporal variability of fair-weather cumulus statistics at the ACRF SGP Site. *Journal of Climate*, 21:3344–3358. doi:<https://doi.org/10.1175/2007JCLI2266.1>
- Campbell - Scientific Inc. (2014 a). *Instruction manual NR01 Four – Component Net Radiation Sensor*. 46 p.
- Campbell - Scientific Inc. (2014 b). *Instruction manual KH20 Krypton Hygrometer*. 20 p.
- Campbell - Scientific Inc. (2014 c). *Instruction manual CSAT3 Three-Dimensional Sonic Anemometer*. 72 p.
- Gu, L, Fuentes J.D., Garstang, M., Da Silva, J.T., Heitz, R., Sigler, J., Shugart, H.H. (2001) Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. *Agric For Meteorol*, 106:117–129. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00209-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00209-4)
- Kivalov, S. N. y Fitzjarrald, D. R. (2018). Quantifying and modelling the effect of cloud shadows on the surface irradiance at tropical and midlatitude forests. *Boundary-Layer Meteorology*, 166: 165-198. doi: <https://doi.org/10.1007/s10546-017-0301-y>

- Lappalainen K, Valkealahti S (2015). Recognition and modeling of irradiance transitions caused by moving clouds. *Solar Energy*, 112:55–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.018>
- Lappalainen K, Valkealahti S (2016). Apparent velocity of shadow edges caused by moving clouds. *Solar Energy*, 138:47–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.008>
- López-Reyes, J. D. y Villegas-De la Portilla, D.J. (2018). *Efectos de las variaciones del balance radiativo por nubosidad intermitente en la evapotranspiración en Xalapa, Veracruz*. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana (México), 65 p.
- Moene, A. F. y Van Dam, J. C. (2014). *Transport in the Atmosphere -Vegetation-Soil Continuum* (Primera ed.). New York: Cambridge University Press, p: 13-89.
- Rodts, S.M.A., Duynkerke, P.G., Jonker, H.J.J. (2003). Size distributions and dynamical properties of shallow cumulus clouds from aircraft observations and satellite data. *J. Atmos. Sci.*, 60:1895–1912. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<1895:SDADPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<1895:SDADPO>2.0.CO;2)
- Stewart I. D. y T. R. Oke (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bull Am. Meteor. Soc.* 93: 1879-1900. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>