

Cristóbal Rosselló, J.; Company, J.; Estrany, J.; Gago, X.; Bozorgi, M. Cuantificación de flujos de energía en regiones insulares mediterráneas bajo cambio climático: implementación del modelo TSEB mediante datos de Teledetección

Cuantificación de flujos de energía en regiones insulares mediterráneas bajo cambio climático: implementación del modelo TSEB mediante datos de Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi ¹ Company, Jaume ² Estrany, Joan ² Gago, Xurxo ³ Bozorgi, Mahsa ⁴

¹ Universitat Autònoma de Barcelona, España

² Natural Risks and Emergencies Observatory of the Balearic Islands—RiscBal, University of the Balearic Islands. Department of Geography and Institute of Agro-Environmental & Water Economy Research-INAGEA

³ Research Group on Plant Biology under Mediterranean Conditions, Department of Biology, University of the Balearic Islands (UIB), Institute of Agroecology and Water Economy (INAGEA)

⁴ Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA

ORCID: Cristóbal Rosselló [0000-0001-6244-4289](https://orcid.org/0000-0001-6244-4289) Estrany [0000-0003-3669-9936](https://orcid.org/0000-0003-3669-9936) Bozorgi [0009-0006-2935-2597](https://orcid.org/0009-0006-2935-2597)

Correspondencia: jordi.cristobal@uab.cat jaume.company@uib.cat joan.estrany@uib.cat jorge.gago@uib.cat
mahsa.bozorgi@irta.cat

RESUMEN

Las regiones insulares mediterráneas están experimentando cambios sin precedentes en respuesta a los impactos del cambio climático. Sin embargo, las retroalimentaciones entre la hidrosfera y los eventos extremos, ya sean antropogénicos o climáticos, requieren mejoras significativas en su cuantificación, especialmente ante fenómenos como lluvias extremas, sequías e incendios forestales. Este trabajo presenta resultados preliminares de la implementación del modelo TSEB (Two-Source Energy Balance) para estimar flujos de energía superficial en la cuenca experimental de Sa Font de la Vila (4.8 km²), Mallorca. Se instaló una torre de flujos de 4 metros equipada con analizador de gases de trayectoria abierta, anemómetro sónico 3D, radiómetro neto y placas de flujo de calor del suelo. El modelo TSEB se ejecutó utilizando datos de temperatura superficial de la torre y datos MODIS Terra/Aqua para el período noviembre 2020 - diciembre 2022. Los resultados muestran un acuerdo aceptable entre el modelo TSEB y los datos de la torre de flujos, permitiendo la futura integración de flujos energéticos diarios. El coeficiente PT mostró mejor acuerdo cuando se forzó a valores más bajos (0.9 vs 1.26).


Palabras clave: *Flujos de energía, TSEB, Torre de flujos, Región insular mediterránea, Recursos hídricos*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 marzo 2026



Cuantificación de flujos de energía en regiones insulares mediterráneas bajo cambio climático: implementación del modelo TSEB mediante datos de Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi ⁽¹⁾, Company, Jaume ⁽²⁾, Estrany, Joan ⁽²⁾, Gago, Xurxo ⁽³⁾, Bozorgi, Mahsa ⁽⁴⁾


⁽¹⁾ Universitat Autònoma de Barcelona, España.

 0000-0001-6244-4289, jordi.cristobal@uab.cat.


⁽²⁾ Natural Risks and Emergencies Observatory of the Balearic Islands—RiscBal, University of the Balearic Islands. Department of Geography and Institute of Agro-Environmental & Water Economy Research-INAGEA.

 0000-0000-0000-0001, jaume.company@uib.cat ;  0000-0003-3669-9936, joan.estrany@uib.cat.

⁽³⁾ Research Group on Plant Biology under Mediterranean Conditions, Department of Biology, University of the Balearic Islands (UIB), Institute of Agroecology and Water Economy (INAGEA).

 0000-0000-0000-0001, jorge.gago@uib.cat.

⁽⁴⁾ Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA.

 0009-0006-2935-2597, mahsa.bozorgi@irta.cat

Resumen: Las regiones insulares mediterráneas están experimentando cambios sin precedentes en respuesta a los impactos del cambio climático. Sin embargo, las retroalimentaciones entre la hidrosfera y los eventos extremos, ya sean antropogénicos o climáticos, requieren mejoras significativas en su cuantificación, especialmente ante fenómenos como lluvias extremas, sequías e incendios forestales. Este trabajo presenta resultados preliminares de la implementación del modelo TSEB (Two-Source Energy Balance) para estimar flujos de energía superficial en la cuenca experimental de Sa Font de la Vila (4.8 km²), Mallorca. Se instaló una torre de flujos de 4 metros equipada con analizador de gases de trayectoria abierta, anemómetro sónico 3D, radiómetro neto y placas de flujo de calor del suelo. El modelo TSEB se ejecutó utilizando datos de temperatura superficial de la torre y datos MODIS Terra/Aqua para el período noviembre 2020 - diciembre 2022. Los resultados muestran un acuerdo aceptable entre el modelo TSEB y los datos de la torre de flujos, permitiendo la futura integración de flujos energéticos diarios. El coeficiente PT mostró mejor acuerdo cuando se forzó a valores más bajos (0.9 vs 1.26).

Palabras clave: Evapotranspiración, temperatura de la superficie terrestre, MODIS (Terra/Aqua), Covarianza de torbellinos

Quantification of energy fluxes in Mediterranean island regions under climate change: implementation of the TSEB model using remote sensing data.

Abstract: Mediterranean island regions are witnessing unprecedented changes in response to climate change impacts. However, feedback between the hydrosphere and extreme events, whether anthropogenic or climatic, require significant improvements in their quantification, especially in the face of extreme phenomena such as extreme rainfall, droughts and wildfires. This work presents preliminary results from implementing the TSEB (Two-Source Energy Balance) model to estimate surface energy fluxes in the Sa Font de la Vila experimental catchment (4.8 km²), Mallorca. A 4-meter flux tower was installed equipped with open-path gas analyzer, 3D sonic anemometer, net radiometer and soil heat flux plates. The TSEB model was run using surface temperature data from the tower and Terra/Aqua MODIS data for the period November 2020 - December 2022. Results show an acceptable agreement between TSEB model and flux tower data, allowing further integration of daily energy fluxes. The PT coefficient showed better agreement when forced to lower values (0.9 vs 1.26).

Keywords: Evapotranspiration, land surface temperature, MODIS (Terra/Aqua), Eddy covariance

1. INTRODUCCIÓN

Las regiones insulares mediterráneas están experimentando cambios sin precedentes en respuesta a los impactos del cambio climático. Las retroalimentaciones entre la hidrosfera y los eventos extremos ya sean antropogénicos o climáticos, requieren mejoras significativas en su cuantificación, especialmente ante fenómenos extremos como lluvias intensas, sequías prolongadas e incendios forestales recurrentes. Esta limitación revela un alto grado de incertidumbre en las predicciones sobre cuánto, qué tan rápido y dónde cambiarán los ecosistemas insulares mediterráneos. También resulta incierto cómo las perturbaciones antropogénicas o naturales como eventos extremos de precipitación, sequías o incendios forestales impactarán sobre los recursos hídricos y la dinámica climática. Por tanto, cuantificar cómo estos eventos extremos afectan a los recursos hídricos y las tendencias espaciotemporales es clave para comprender cómo evolucionarán los ecosistemas insulares mediterráneos en el futuro. El objetivo principal de este estudio es investigar los patrones espaciotemporales de los flujos de energía, especialmente el calor latente o evapotranspiración (ET), controlados por cambios en las condiciones de la superficie terrestre y la cobertura vegetal, bajo los efectos del cambio global a escalas local (cuenca) y regional. Para ello, se implementó el modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) a escala local combinando datos de una torre de flujos instalada en la cuenca experimental de Sa Font de la Vila (Mallorca) así como datos de Teledetección MODIS para su futura implementación a nivel regional en cuencas insulares mediterráneas.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca experimental de Sa Font de la Vila está localizada en la isla de Mallorca (Fig. 1), con una superficie de 4.8 km² (2407 ha). El área ha experimentado revegetación natural de antiguos cultivos agrícolas y recurrencia de incendios forestales, con eventos significativos en 1994 y 2013 (Lucas-Borja *et al.*, 2018). Los usos del suelo dominantes son bosque (51%), matorral (33%), cultivos arbóreos de secano (12%), cultivos herbáceos de secano (1%) y usos urbanos (3%). La vegetación actual incluye especies como *Pinus halepensis*, *Ampelodesmos mauritanica*, *Chamaerops humilis*, *Quercus ilex*, *Calicotome spinosa*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus albidus* y *Erica multiflora* (entre otras). Desde 2013 se monitoriza continuamente el flujo de agua y sedimentos, temperatura del aire, precipitación y humedad del suelo en diferentes puntos de la cuenca. En noviembre de 2020 se instaló una torre de flujos de 4 metros de altura en la subcuenca de So na Vidala (4.9 hectáreas), equipada con instrumentación avanzada para mediciones micrometeorológicas continuas.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Torre de flujos de energía

La torre de flujos instalada en So na Vidala está equipada con un sistema integrado IRGASON que combina

analizador de gases de trayectoria abierta y anemómetro sónico 3D con una frecuencia de adquisición de datos de 20Hz. Este sistema mide de forma continua concentraciones absolutas de dióxido de carbono y vapor de agua, temperatura del aire, presión barométrica, velocidad del viento en tres dimensiones y temperatura sónica del aire. Adicionalmente, la torre incluye un radiómetro neto CNR-4 para mediciones de radiación de onda corta y onda larga, dos placas de flujo de calor auto-calibrables HFP01SC-L instaladas en el suelo, y una sonda termopares TCAV para mediciones promediadas de temperatura del suelo. Todos los sensores están conectados a un registrador de datos CR1000X que almacena mediciones en intervalos de 30 minutos. La estación también cuenta con sensores adicionales para temperatura y humedad relativa del aire, precipitación, presión atmosférica, radiación solar, dirección y velocidad del viento, además de 12 sondas de humedad del suelo, temperatura y conductividad eléctrica distribuidas espacialmente en la subcuenca y 6 diversos sensores de temperatura infrarroja distribuidos por el *footprint* de la torre.

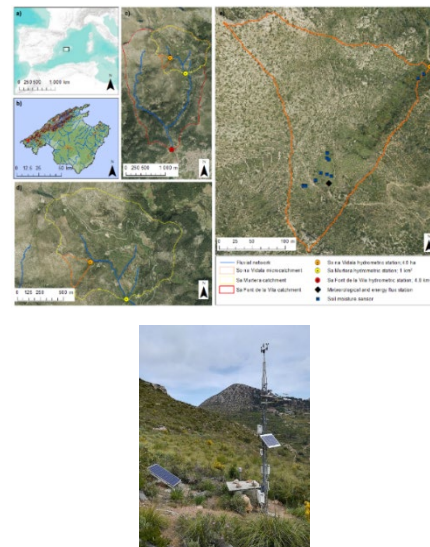


Figura 1. Zona de estudio de Sa Font de la Vila (imagen superior). Detalle de la estación de flujos de energía (imagen inferior).

3.2. Datos de Teledetección

Para explorar la potencial aplicación a nivel regional del modelo a nivel espaciotemporal, se utilizaron productos MODIS de los satélites Terra y Aqua para obtener temperatura de superficie terrestre (LST), índice de área foliar (LAI) y los índices de vegetación NDVI y EVI. Estos productos proporcionan información sobre la fracción de cobertura vegetal (f_G) necesaria para el modelo TSEB. La resolución espacial de los productos MODIS utilizados es de 500 m, menos la LST que es de 1000 m.

3.3. El modelo TSEB

El modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) desarrollado por Norman *et al.* (1995) es un modelo basado en temperatura de la superficie (T_{RAD}) que separa el balance energético de dos fuentes: vegetación y suelo (Fig. 2). El modelo integra el flujo de calor sensible del

dosel vegetal (H_c) y del suelo (H_s), utilizando resistencias aerodinámicas (R_A), resistencia de la capa límite foliar (R_x) y resistencia de la capa límite del suelo (R_s). Las entradas principales del modelo incluyen datos de Teledetección (MODIS Terra/Aqua para LAI, NDVI/EVI y LST), datos de la torre de flujos (LST medida cada 30 minutos con pirgeómetro) y datos meteorológicos (radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento, presión atmosférica y presión de vapor actual).

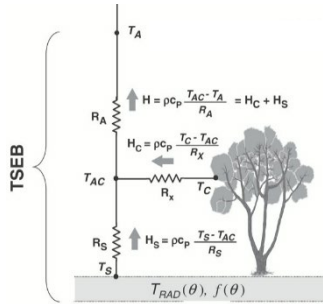


Figura 2. Esquema del modelo TSEB. T_A : temperatura del aire, T_{AC} : temperatura del aire en el dosel, H : calor sensible del dosel (H_c) y del suelo (H_s), R_A : resistencia aerodinámica, R_x : resistencia de la capa límite foliar agregada, R_s : resistencia de la capa límite de la superficie del suelo, T_{RAD} : temperatura de la superficie (o LST), $f(\theta)$: fracción de cobertura de vegetación.

3.4. Ejecución y evaluación del modelo

El modelo se ejecutó para el período desde noviembre de 2020 hasta diciembre de 2022 a escala local usando los datos de LST del pirgeómetro y a escala regional usando los datos de LST de los satélites Terra y Aqua (MOD11). Se evaluó el rendimiento del modelo bajo diferentes condiciones: cielo despejado y nublado, radiación neta mayor a $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, cierre de energía de la estación de flujos superior a 0.65, y dos valores diferentes del coeficiente de Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972): $PT = 0.9$ y $PT = 1.26$. El valor de PT igual a 1.26 es el de la formulación original de TSEB asumiendo condiciones de evapotranspiración potencial donde el agua no es limitante. Teniendo en cuenta que las especies mediterráneas han desarrollado mecanismos de resistencia a la sequía que limitan la transpiración, el valor de PT se ajustó a 0.9 permitiendo que el modelo TSEB capturara mejor la realidad fisiológica de los ecosistemas mediterráneos, como Cristóbal *et al.* (2020) sugirió en ambientes árticos y subárticos. El flujo de calor del suelo (G) se estableció como el 10 % de la radiación neta (R_n). Para el cálculo de los flujos se usó la librería pyTSEB (github.com/hectornieto/pyTSEB) con modificaciones para el cálculo de la emisividad atmosférica en días nublados (Cristóbal *et al.*, 2020). La evaluación del modelo TSEB se realizó comparando las estimaciones de flujo de calor latente con las mediciones directas de la torre mediante el método de covarianza de torbellinos. Se calcularon estadísticos de error incluyendo la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo medio (bias) y el coeficiente de determinación (R^2) para intervalos de 30 minutos y promedios diarios.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación con datos de la torre de flujos

Los resultados preliminares muestran un acuerdo aceptable entre las estimaciones del modelo TSEB y los datos medidos por la torre de flujos (Fig. 3 y Tabla 1). Para datos de covarianza de torbellinos a intervalos de 30 minutos ($n = 4157$), el modelo evaluado con coeficiente $PT = 0.9$ mostró un RMSE promedio de $51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para todos los flujos, un MBE de $-19.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y R^2 de 0.63. El modelo forzado con $PT = 1.26$ presentó RMSE promedio para todos los flujos de $61 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, un MBE de $-18.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $R^2 = 0.63$. Los resultados indican que el coeficiente PT muestra mejor acuerdo cuando el modelo se fuerza a utilizar un valor más bajo de PT (0.9), especialmente en la estimación de LE y H (Tabla 1 y Fig. 3). Este valor reducido de PT refleja las condiciones más características de la vegetación mediterránea. En ambos casos los resultados están cerca de un valor marco de $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ considerado como óptimo para escalar los datos a flujos diarios.

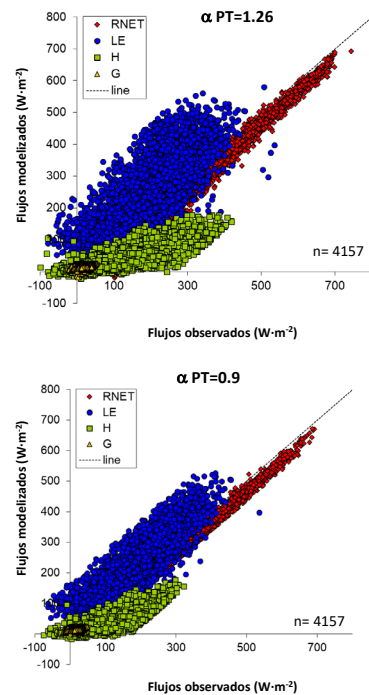


Figura 3. Resultados de la modelización de los flujos de energía con el método TSEB a escala local usando datos de LST medidos por el pirgeómetro del sensor de radiación neta (panel superior) usando un valor de PT de 1.26 (panel superior) y de 0.9 (panel inferior). line es la línea de correlación máxima 1:1

4.2. Evaluación con datos satelitales MODIS

La evaluación del modelo utilizando temperatura superficial de MODIS y un coeficiente PT de 0.9 mostró resultados variables según el sensor (Fig. 4, Tabla 2). Para Terra MODIS ($n = 111$ observaciones), el modelo alcanzó RMSE promedio para todos los flujos de $51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, MBE de $-18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $R^2 = 0.63$ con $PT = 0.9$. Para Aqua MODIS ($n = 53$ observaciones), los estadísticos fueron RMSE = $61.25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, MBE = $-19.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $R^2 = 0.61$. Los resultados, similares a la modelización con los

datos de la LST de la torre de flujos, muestran una futura integración de datos de Teledetección para la estimación espacial de los flujos de energía a escala regional.

Tabla 1. Estimadores del error y de la correlación entre los flujos estimados por TSEB y observados en la torre de flujos de energía con un coeficiente PT de 0.9. Rn: radiación neta, LE: flujo de calor latente, H flujo de calor sensible, G: flujo de calor del suelo. RMSE y MBE en W-m-2

PT		Rn	LE	H	G	n
1.26	R ²	0.98	0.73	0.73	0.01	4157
	RMSE	46	85	98	16	
	MBE	-39	44	-77	-6	
0.9	R ²	0.98	0.82	0.72	0.01	4157
	RMSE	44	65	80	14	
	MBE	-37	32	-64	-4	

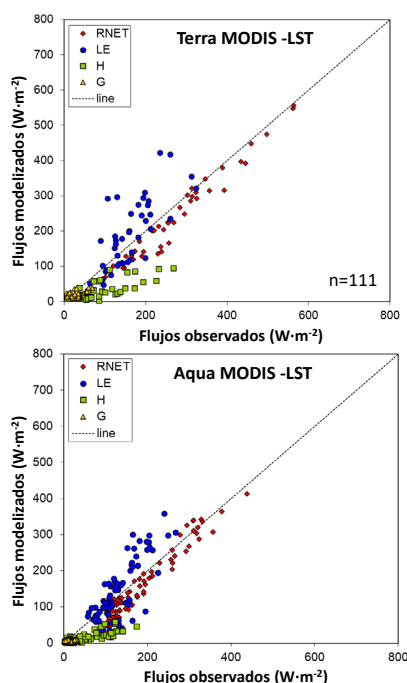


Figura 4. Resultados de la modelización de los flujos de energía con el método TSEB usando datos de LST del satélite Terra (panel superior) y Aqua (panel inferior) con una resolución espacial de 1000m. line es la línea de correlación máxima 1:1

Tabla 2. Estimadores del error y de la correlación entre los flujos estimados por TSEB y observados en la torre de flujos de energía. Sat: satélite, RMSE y MBE en W-m-2

Sat		Rn	LE	H	G	n
AQUA	R ²	0.98	0.73	0.73	0.01	53
	RMSE	46	85	98	16	
	MBE	-39	44	-77	-6	
TERRA	R ²	0.98	0.82	0.72	0.01	111
	RMSE	44	65	80	14	
	MBE	-37	32	-64	-4	

5. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares demuestran que el modelo TSEB presenta un acuerdo aceptable con los datos de la torre de flujos, permitiendo la futura integración de flujos energéticos a escala diaria. El coeficiente PT muestra mejor ajuste cuando se utiliza un valor de 0.9 en lugar del valor estándar de 1.26, lo cual es coherente en ecosistemas mediterráneos caracterizados por mayor estrés hídrico. El modelo presentó resultados similares cuando se aplicó con la LST de Terra MODIS, pero menor acuerdo con Aqua MODIS, indicando la necesidad de investigación adicional para optimizar la parametrización según el sensor utilizado. Estos resultados preliminares establecen una base sólida para el escalado espacial de estimaciones de flujos energéticos en la región insular mediterránea a escala regional. El trabajo futuro se centrará en el escalado de flujos de energía instantáneos a diarios con datos Sentinel-2 a 20 m de resolución espacial mediante el marco de modelado SenET (<https://www.esa-sen4et.org/>) permitiendo una comprensión completa de la dinámica de los flujos de energía y su relación con la disponibilidad de recursos hídricos en el contexto de cambio global. Además, se están procesando los datos para toda la serie temporal hasta diciembre de 2025 para llevar a cabo una evaluación temporal en condiciones de sequía.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2021-123707OB-I00 (MEDhyCON-3), UIB-FPI-2021 y PRD2018/54 (InsoFlux), ET4DROUGHT (PID2021-127345OR-C31) y CALIB-FIRE (PID2023-151124NB-I00).

7. REFERENCIAS

- Lucas-Borja, M. E., Calsamiglia, A., Fortes, J., García-Comendador, J., Lozano Guardiola, E., García-Orenes, F., Gago, J., & Estrany, J. (2018). The role of wildfire on soil quality in abandoned terraces of three Mediterranean micro-catchments. *Catena*, 170, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.014>
- Cristóbal, J., Prakash, A., Anderson, M. C., Kustas, W. P., Alfieri, J. G., & Gens, R. (2020). Surface energy flux estimation in two boreal settings in Alaska using a thermal-based remote sensing model. *Remote Sensing*, 12(24), Article 4108. <https://doi.org/10.3390/rs12244108>
- Norman, J., Kustas, W., & Humes, K. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2)