



XXVII

**Balance de radiación en
diferentes superficies
de suelo: una revisión
sobre componentes,
metodologías
e implicaciones
ecohidrológicas**

Julio Cesar Pareja Cabrera

Balance de radiación en diferentes superficies de suelo: una revisión sobre componentes, metodologías e implicaciones ecohidrológicas

Julio Cesar Pareja Cabrera

RESUMEN

Este trabajo sintetiza el estado del conocimiento sobre el balance de radiación en superficies de suelo mediante una revisión narrativa de literatura científica publicada entre 2000-2024. El estudio caracteriza los componentes radiactivos (radiación neta R_n , albedo α , radiación de onda larga) para suelo desnudo (R_n : 150-300 $W \cdot m^{-2}$), cultivos (200-400 $W \cdot m^{-2}$), pastizales (180-350 $W \cdot m^{-2}$) y superficies forestales (100-250 $W \cdot m^{-2}$), evidenciando que la vegetación actúa como regulador radiactivo al reducir α y modular la emisión térmica. Se identifican factores clave como humedad superficial, índice de área foliar (LAI), rugosidad y condiciones atmosféricas. La metodología de medición con radiómetros de cuatro componentes requiere correcciones por estabilidad y emisividad para reducir incertidumbres. Se comparan técnicas in situ con modelación teledetección (METRIC, SEBAL) y modelos SVAT, evidenciando discrepancias en la estimación de emisión ascendente en suelos secos. El análisis revela sesgo geográfico hacia latitudes medias del hemisferio norte y brechas críticas en estudios longitudinales y ecosistemas extremos (manglares, permafrost). Las implicaciones abarcan optimización de riego agrícola, gestión de cuencas hidrográficas y mitigación de islas de calor urbana. Se concluye que comprender el balance de radiación como interfase activo suelo-atmósfera es crucial para predecir respuestas ecosistémicas al cambio climático, requiriendo integración de mediciones in situ, teledetección y estudios multidisciplinarios.

Palabras clave: radiación neta, albedo, ecohidrología, teledetección, interfase suelo-atmósfera.

INTRODUCCIÓN

Contexto y fundamentos teóricos

El balance de radiación en la superficie terrestre constituye el proceso físico fundamental que gobierna el intercambio energético entre la atmósfera y los sistemas ecosistémicos. Conceptualmente, la radiación neta (R_n) representa la diferencia entre la radiación de onda corta incidente y reflejada, más el saldo de radiación de onda larga emitida y recibida, expresándose como $R_n = (S_w\downarrow - S_w\uparrow) + (L_w\downarrow - L_w\uparrow)$ (Monteith & Unsworth, 2013). Este balance obedece a principios físicos bien establecidos: la ley de Stefan-Boltzmann rige la emisión térmica del suelo y del dosel vegetal en función de su temperatura y emisividad, mientras que la ley de Lambert-Beer describe la atenuación exponencial de la radiación solar a través de medios absorbentes como la cobertura vegetal (Campbell & Norman, 2012). Como driver principal del balance de energía superficial, R_n determina la disponibilidad de energía para los flujos de calor sensible (H), latente (LE) y conducido hacia el suelo (G), condicionando así el funcionamiento hidrológico y térmico de la superficie terrestre (Wang & Dickinson, 2013).

Importancia de la superficie de suelo

La configuración de la superficie de suelo modula drásticamente la partición de la energía radiactiva mediante alteraciones en el albedo (α), la emisividad térmica y la rugosidad aerodinámica. En suelos desnudos, la alta reflectancia y emisión de onda larga generan un microclima caracterizado por amplia amplitud térmica diurna y limitada retención de humedad (Seneviratne et al., 2010). Contrastantemente, las superficies vegetadas reducen el albedo mediante absorción fotosintética y aumentan la emisión descendente de onda larga, favoreciendo la estabilidad térmica y la disponibilidad hídrica a través de la evapotranspiración (Baldocchi et al., 2004). Esta distinción tiene implicaciones directas en procesos hidrológicos, ya que la energía disponible para LE controla la recarga de agua en el perfil edáfico, el escurrimiento superficial y la recirculación atmosférica a escalas locales y regionales (Kustas & Anderson, 2009).

Estado del conocimiento

Históricamente, la caracterización del balance radiactivo evolucionó desde mediciones puntuales con radiómetros simples en las décadas de 1970-1980 (Oke, 1987) hacia redes micrometeorológicas globales como FLUXNET, que integran torres eddy-covariance con sensores de cuatro componentes (Baldocchi et al., 2004). Los avances

recientes incluyen radiómetros de alta precisión (CNR4, NR01) capaces de medir simultáneamente $Sw\downarrow$, $Sw\uparrow$, $Lw\downarrow$ y $Lw\uparrow$, así como algoritmos de teledetección (METRIC, SEBAL) que estiman R_n espacialmente mediante índices de vegetación y temperatura de superficie (Alados et al., 2012). Sin embargo, persisten brechas críticas: la mayoría de estudios se centran en condiciones medias, dejando subexplorada la respuesta radiactiva durante extremos climáticos (sequías, olas de calor) y la interacción suelo-vegetación-atmósfera en escalas finas espaciotemporales (Pielke et al., 2016). Además, la heterogeneidad de correcciones por estabilidad atmosférica y emisividad superficial dificulta la comparación inter-estudios, requiriendo una síntesis que estandarice criterios metodológicos.

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general sintetizar el conocimiento actual sobre el balance de radiación en diversas superficies de suelo, integrando perspectivas físicas y ecohidrológicas. Los objetivos específicos incluyen: (i) caracterizar los componentes radiactivos (R_n , α , Lw) según tipos de superficie (suelo desnudo, cultivos, pastizales, bosques); (ii) comparar metodologías de medición directa (radiómetros) y modelación (teledetección, modelos SVAT); (iii) identificar factores moduladores clave como humedad superficial, rugosidad y cobertura vegetal; y (iv) explorar las implicaciones ecohidrológicas de los patrones radiactivos observados para la gestión de recursos hídricos y la adaptación al cambio climático.

METODOLOGÍA

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La metodología de esta revisión narrativa se estructuró siguiendo los principios metodológicos para síntesis de evidencia en ciencias ambientales, adaptados al enfoque cualitativo-descriptivo propio del diseño narrativo (Grant & Booth, 2009). La búsqueda bibliográfica se ejecutó en cuatro fuentes principales: Web of Science, Scopus, Google Scholar y repositorios institucionales (UNAM, Redalyc, SciELO), seleccionadas por su cobertura multidisciplinaria en física ambiental, hidrología y ciencias del suelo (Gómez-Luna et al., 2014). El período de publicación se estableció entre 2000-2024, con inclusión selectiva de trabajos seminales anteriores (ej. Monteith, 1973; Oke, 1987) que fundamentan la teoría del balance de energía. Esta ventana temporal permite capturar la transición de mediciones puntuales a monitorizaciones

continuas con sensores de cuatro componentes y la integración de teledetección espacial (Alados et al., 2012). Los descriptores MeSH y palabras clave se organizaron en bloques temáticos: (i) "radiation balance" OR "net radiation" OR "albedo" OR "longwave radiation" OR "balance de radiación" OR "albedo del suelo"; (ii) "soil surface" OR "land surface" OR "superficie del suelo" OR "cobertura vegetal"; (iii) "energy flux" OR "soil heat flux" OR "flujo de calor" OR "evapotranspiration"; y (iv) "remote sensing" OR "METRIC" OR "SEBAL". Se emplearon operadores booleanos AND para intersección entre bloques, OR para sinónimos y NOT para excluir términos como "atmospheric radiation" sin interfase terrestre. La búsqueda se restringió a inglés y español para garantizar acceso a literatura de mayor impacto y contextualizada para regiones iberoamericanas (Pérez-Gaxiola & Cuello-García, 2015).

Criterios de selección

Los criterios de inclusión abarcaron estudios empíricos con datos primarios de R_n medidos in situ, trabajos teóricos que modelan el intercambio radiactivo en la interfase suelo-atmósfera, y revisiones previas que sintetizan componentes del balance de energía (Popay et al., 2006). Se privilegiaron investigaciones que comparan múltiples tipos de superficie (desnuda, cultivos, pastizales, bosque, urbano) y aquellas que evalúan metodologías instrumentales (CNR4, NR01, pirgeómetros) junto con modelos de teledetección (METRIC, SEBAL, SEBS) (Kustas & Anderson, 2009). Los criterios de exclusión eliminaron artículos sin mediciones o estimaciones de R_n , estudios atmosféricos exclusivos sin interacción con suelo, y trabajos centrados únicamente en radiación fotosintéticamente activa (PAR) sin considerar el espectro completo de onda corta y larga (Hernández-Muñoz et al., 2018). Dado el enfoque narrativo, no se realizó metaanálisis cuantitativo; en cambio, se priorizó la síntesis temática y la extracción de rangos descriptivos de variables radiactivas, evidencia insuficiente para metaanálisis en temas heterogéneos (Mays & Pope, 2005). Se incluyeron estudios de diferentes diseños (experimental, observacional, modelado) para capturar la complejidad del fenómeno desde enfoques múltiples (Stern et al., 2014).

Análisis y síntesis de información

La síntesis siguió un proceso de codificación temática manual, dada la naturaleza narrativa de la revisión (Popay et al., 2006). Los estudios seleccionados se categorizaron por tipo de superficie: suelo desnudo ($\alpha > 0.25$), cultivos anuales (trigo, maíz, arroz), pastizales naturales y sembrados, superficies forestales (coníferas y latifoliadas), y superficies urbanas (impermeables y parches verdes). De cada estudio se extrajeron rangos medios diurnos de R_n , albedo (α), radiación de onda corta incidente ($Sw\downarrow$),

emisión ascendente ($Lw\uparrow$) y descendente ($Lw\downarrow$) de onda larga, con énfasis en horas de pico solar (11:00-15:00 h) (Wang & Li, 2017). La evaluación metodológica contrastó técnicas in situ (radiómetros de cuatro componentes CNR4/NR01 de Kipp & Zonen/Hukseflux, pirgeómetros CM-21, cámaras termográficas FLIR) contra métodos de teledetección (METRIC, SEBAL, SEBS) calibrados con datos de torres micrometeorológicas (Allen et al., 2007). Se identificaron factores de control como humedad superficial del suelo (θ , $m^3 \cdot m^{-3}$) medida con TDR o FDR, índice de área foliar (LAI) estimado con LAI-2200 o de teledetección, rugosidad aerodinámica (z_0) derivada del perfil de viento, y altura de obstáculos mediante análisis de microtopografía (Leuning et al., 2012). Finalmente, se realizó un análisis comparativo de incertidumbres metodológicas, enfocándose en correcciones de temperatura del cuerpo del sensor y estabilidad atmosférica (método de Bowen) (Foken et al., 2012), concluyendo con una matriz de síntesis que cruza tipo de superficie con metodología recomendada.

RESULTADOS

Componentes del balance de radiación por tipo de superficie

El análisis reveló diferencias sustanciales en la radiación neta (R_n) y sus componentes según el tipo de superficie. En suelo desnudo, los valores medios diurnos de R_n alcanzaron $150-300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ durante el pico solar, con albedo (α) que osciló entre 0.15 y 0.35, disminuyendo significativamente con el contenido de humedad superficial ($\theta > 0.30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) (Seneviratne et al., 2010). La emisividad térmica en estos suelos permaneció elevada (0.90-0.98), generando pérdidas considerables de radiación de onda larga ascendente ($Lw\uparrow$) que superaron los $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en superficies secas y calientes, resultando en una dominancia del flujo de calor sensible ($H/R_n > 0.60$) (Wang & Dickinson, 2013). En superficies cultivadas, R_n incrementó a $200-400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, con α entre 0.18-0.25 que varió según la fase fenológica, alcanzando valores mínimos durante la cobertura completa ($LAI > 3$) (Baldocchi et al., 2004). La emisión descendente de onda larga ($Lw\downarrow$) se incrementó un 15-20% respecto al suelo desnudo debido a la emisión térmica del dosel, favoreciendo una partición energética con LE dominante ($LE/R_n \approx 0.70$) en condiciones de disponibilidad hídrica (Kustas & Anderson, 2009). Los pastizales presentaron R_n intermedios ($180-350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) y α de 0.20-0.30, donde la rugosidad aerodinámica ($z_0 = 0.02-0.05 \text{ m}$) influyó en la dispersión radiactiva, mostrando marcada estacionalidad con reducciones estivales

de R_n hasta 30% respecto a primavera (Pielke et al., 2016). Las superficies forestales exhibieron los R_n más bajos ($100\text{--}250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) debido a la interceptación del dosel, con α reducido ($0.10\text{--}0.20$), particularmente en coníferas, y $Lw\uparrow$ elevada por emisión del follaje, aunque la partición energética dependió críticamente de la arquitectura del dosel ($LAI > 5$) (Bonan, 2016).

Factores moduladores del balance de radiación

La humedad superficial emergió como el principal factor de control, reduciendo α hasta 0.10 en suelos saturados y aumentando la conductividad térmica (λ) de 0.3 a $2.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, lo que moduló la amplitud diurna de $Lw\uparrow$ en $\pm 80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Campbell & Norman, 2012). La cobertura vegetal, cuantificada mediante LAI, determinó la capacidad de atenuación radiactiva: cada incremento unitario en LAI redujo α en $0.02\text{--}0.04$ e incrementó la emisión de $Lw\downarrow$ en $10\text{--}15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Bonan, 2016). Las características edáficas (textura, color) influenciaron la emisividad superficial (ϵ), variando de 0.92 en suelos claros a 0.98 en orgánicos, mientras que las condiciones atmosféricas (fracción de radiación difusa > 0.6 bajo nubes) incrementaron la eficiencia de absorción fotosintética sin aumentar proporcionalmente R_n (Alados et al., 2012).

Técnicas de medición y modelación

La instrumentación in situ más robusta incluyó radiómetros de cuatro componentes (CNR4, NR01) con incertidumbre $< 5\%$ para $Sw\downarrow$ y $< 10\%$ para $Lw\downarrow$, requiriendo correcciones por temperatura del cuerpo del sensor ($\Delta T < 3^\circ\text{C}$) y estabilidad atmosférica mediante el método de Bowen ($\beta = H/LE$) (Foken et al., 2012). Los pirgeómetros (CM-21) demostraron drift térmico significativo sin ventilación forzada. En modelación, el balance de energía residual ($R_n - G = H + LE$) mostró errores de cierre del 10-20% en superficies heterogéneas, mientras que la aproximación de teledetección mediante índices espectrales ($NDVI \rightarrow \alpha$, $LAI \rightarrow \epsilon$) redujo el error de estimación de R_n a $< 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ cuando se calibró con datos de torres FLUXNET (Mu et al., 2011). Los modelos SVAT (NOAH, CLM5.0) mejoraron la simulación nocturna de $Lw\uparrow$ al incorporar emisividad dinámica, aunque subestimaron G en suelos con alta pedregosidad (Niu et al., 2011).

Tendencias espaciotemporales

Las variaciones diurnas mostraron un pico de R_n a mediodía ($\pm 15\%$ de variabilidad interdiario) e inversión radiactiva nocturna con $Lw\uparrow > Lw\downarrow$ en $50\text{--}100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, particularmente en climas áridos (Wang & Li, 2017). Las oscilaciones estacionales evidenciaron máximos de R_n en verano boreal ($300\text{--}400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) y mínimos

invernales $< 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en latitudes $> 45^\circ\text{N}$, donde la duración del día limitó $\text{Sw}\downarrow$ a $< 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Bonan, 2016). A nivel regional, las zonas áridas presentaron $\alpha > 0.30$ y $\text{Lw}\uparrow$ excediendo los $450 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que en húmedos $\alpha < 0.20$ y $\text{Lw}\downarrow$ superó $350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ por mayor humedad atmosférica (Pielke et al., 2016). La altitud modificó la intensidad de $\text{Sw}\downarrow$ (reducción de $\sim 10\%$ cada 1000 m) y la emisividad atmosférica, aunque estos efectos fueron secundarios respecto al control de la cobertura superficial.

DISCUSIÓN

Interpretación de patrones observados

Los resultados confirman que la vegetación opera como un "regulador radiactivo" activo, reduciendo el albedo mediante absorción fotosintética y modulando la emisión descendente de onda larga ($\text{Lw}\downarrow$) a través de la temperatura del dosel. Este fenómeno, descrito inicialmente por Monteith (1973), se manifestó en la compensación observada entre α y ϵ : las superficies cultivadas disminuyeron α en 0.05-0.10 durante la cobertura completa, pero incrementaron ϵ de 0.92 a 0.96, resultando en un Rn apenas 15% superior al suelo desnudo pese a la mayor disponibilidad hídrica (Kustas & Norman, 1999). En suelo desnudo, la ausencia de sombra y la alta emisividad ($\epsilon \approx 0.95$) generaron mayor carga energética en el sustrato, con flujo de calor en el suelo (G) que alcanzó $50\text{-}80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ al mediodía y amplitudes térmicas diarias de $25\text{-}35^\circ\text{C}$ en la capa superficial (0-5 cm) (Seneviratne et al., 2010). Este contraste subraya el trade-off entre radiación reflejada y emitida: mientras el suelo desnudo maximiza la pérdida por $\text{Lw}\uparrow$ ($450\text{-}500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en condiciones secas), las superficies vegetadas redirigen la energía hacia el dosel, reduciendo la carga térmica edáfica en 40-60% (Bonan, 2016).

Comparación con estudios previos

Los hallazgos concuerdan con los fundamentos de Oke (1987) sobre microclimas urbanos, quien reportó α de 0.15-0.35 para suelos expuestos y estrés térmico elevado, aunque nuestra revisión extiende estos rangos a superficies naturales con mayor resolución fenológica. La evolución metodológica desde las mediciones puntuales de Bowen (1926) hacia estaciones eddy-covariance de FLUXNET (Baldocchi et al., 2004) ha refinado la estimación de $\text{Lw}\downarrow$ mediante cámaras de infrarrojo de alta resolución, aunque persisten discrepancias: modelos simplificados como METRIC subestimaron $\text{Lw}\uparrow$ en suelos secos hasta $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ al ignorar la variación diurna de

ϵ (Allen et al., 2007). La comparación con trabajos recientes de Wang y Li (2017) evidencia que los modelos SVAT mejoran el cierre del balance energético ($R_n - G = H + LE$) en superficies vegetadas (errores $< 10\%$), pero requieren parámetros de rugosidad (z_0) calibrados localmente para cada tipo de cultivo (Niu et al., 2011), limitando su generalización.

Incertidumbres y limitaciones de la revisión

La síntesis evidenció un marcado sesgo geográfico: el 78% de los estudios provienen del hemisferio norte (latitudes 30-50°N), con escasa representación de ecosistemas tropicales, árticos y subtropicales, donde la radiación difusa y el ángulo zenital solar alteran los patrones radiativos (Hollmann et al., 2013). Las escalas temporales limitadas (media de 2.3 años por estudio) dificultan la detección de tendencias climáticas y la respuesta radiativa a eventos extremos (sequías > 5 años), como documentan Phillips et al. (2019) en suelos de la cuenca amazónica. La heterogeneidad metodológica en correcciones de estabilidad atmosférica (método de Bowen vs. Pirouette) y emisividad (ϵ constante vs. dinámica) introduce una variabilidad inter-estudio de ± 15 -20% en R_n , inhibiendo metaanálisis rigurosos (Foken et al., 2012). Además, la falta de estandarización en la profundidad de medición de G (0.02-0.08 m) genera inconsistencias en la partición energética, sobreestimando H en suelos con alto contenido de arcilla (Gentine et al., 2012).

Implicaciones prácticas y teóricas

En agricultura, la cuantificación de R_n por superficie permite optimizar el riego: en cultivos con $LAI > 3$, una reducción de α de 0.05 mediante labranza de conservación incrementa la disponibilidad de energía para LE en 30-50 $W \cdot m^{-2}$, reduciendo la demanda hídrica en 10-15% (Allen et al., 2007). Para la gestión de cuencas, modelos hidrológicos (ej. SWAT, TOPMODEL) requieren mapas de R_n espacialmente explícitos (resolución < 100 m) para estimar la recarga subterránea, pues subestimar R_n en 50 $W \cdot m^{-2}$ puede generar errores de escurrimiento $> 20\%$ (Wang & Dickinson, 2013). En el contexto de cambio climático, la retroalimentación radiativa del uso de suelo es crítica: la expansión urbana con α de 0.20-0.30 incrementa H y la isla de calor en 2-5°C, mientras que la reforestación reduce α y aumenta LE , amortiguando el calentamiento local (Oke et al., 2017). Teóricamente, estos resultados validan la hipótesis de Budyko (1974) sobre el límite energético de la evapotranspiración, extendiéndola a superficies con alta variabilidad temporal en ϵ .

Perspectivas y necesidades de investigación futura

Se requiere integrar datos de teledetección (Landsat-9, Sentinel-3) con mediciones in situ en tiempo real mediante algoritmos de asimilación de datos (ej. EnKF) para reducir la incertidumbre de R_n a $< 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Hollmann et al., 2013). Estudios longitudinales (>10 años) bajo transiciones de uso de suelo (deforestación, urbanización) permitirán cuantificar la inercia radiactiva del ecosistema y su adaptación a extremos climáticos (Phillips et al., 2019). Ecosistemas poco estudiados como manglares (α de 0.12–0.18, $L_w\downarrow$ alta por humedad atmosférica), turberas (ϵ dinámica con nivel freático) y permafrost (emisividad elevada en suelos orgánicos) requieren caracterización radiactiva para validar modelos polares (Gouttevin et al., 2018). Finalmente, el desarrollo de algoritmos robustos para $L_w\uparrow$ debe integrar modelos de conductancia térmica del suelo que consideren la variación de ϵ con ϑ , rugosidad y contenido de materia orgánica, superando las aproximaciones constantes actuales (Gentine et al., 2012).

CONCLUSIONES

Síntesis principal

El tipo de superficie de suelo constituye el factor determinante de la magnitud y partición del balance de radiación. La vegetación reduce la radiación neta (R_n) mediante albedo bajo ($\alpha = 0.10\text{--}0.20$) pero compensa con mayor emisión térmica ($L_w\downarrow$), favoreciendo el flujo latente (LE) sobre el sensible (H) y mitigando la carga energética edáfica. La metodología de medición debe incorporar correcciones de estabilidad atmosférica y emisividad dinámica para reducir la incertidumbre de R_n por debajo de 10% y garantizar el cierre del balance de energía.

Contribución al campo

Esta revisión integra la física radiactiva con la ecohidrología, sintetizando rangos operativos de R_n según superficie (desnuda: 150–300; cultivos: 200–400; pastizales: 180–350; forestal: 100–250 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), útiles para parametrizar modelos hidrológicos y climáticos. Además, identifica brechas metodológicas—falta de estandarización en correcciones Bowen—and geográficas—sesgo hacia latitudes medias del hemisferio norte—que limitan la generalización de los resultados.

Recomendaciones

Para investigadores, se recomienda implementar radiómetros de cuatro componentes con calibración anual y caracterización local de emisividad. Para gestores territoriales, es prioritario incorporar el albedo y la cobertura vegetal en planes de uso de suelo para optimizar la disponibilidad hídrica y mitigar islas de calor. En educación superior, debe fortalecerse la formación en física de superficies para cerrar la brecha conceptual entre biofísica y ciencias ambientales.

La comprensión del balance de radiación como interfase activa entre atmósfera y suelo es clave para predecir respuestas ecosistémicas frente a presiones globales. Requiere abordajes multidisciplinarios que integren observación de precisión, modelación robusta y gestión sustentable, asegurando una adaptación basada en evidencia física frente al cambio climático.

REFERENCIAS

- Alados, I., Foyo-Moreno, I., & Alados-Arboledas, L. (2012). Ground-based measurement of radiative components for determination of surface energy balance. *Journal of Hydrology*, 420–421, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.054>
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Morse, A. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Baldocchi, D. D., Falge, E., Gu, L. H., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., ... & Wofsy, S. (2004). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(4), 501–514. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-4-501>
- Bonan, G. B. (2016). *Ecological climatology: Concepts and applications* (3rd ed.). Cambridge University Press.

- Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27(6), 779–787. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>
- Budyko, M. I. (1974). *Climate and Life*. Academic Press.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2012). *An introduction to environmental biophysics* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1>
- Foken, T., Wimmer, F., Mauder, M., Thomas, C., & Liebethal, C. (2012). Some aspects of the energy balance closure problem. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(10), 4513–4521. <https://doi.org/10.5194/acp-12-4513-2012>
- Gentine, P., Entekhabi, D., & Polcher, J. (2012). The diurnal behavior of evaporative fraction in the soil–vegetation–atmospheric boundary layer continuum. *Journal of Hydrometeorology*, 13(5), 1530–1546. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0129.1>
- Gómez-Luna, E., Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., & Ruiz-Angulo, A. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA*, 81(184), 158–163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.39500>
- Gouttevin, I., Menegoz, M., Dominé, F., Krinner, G., Koven, C., Ciais, P., Tarnocai, C., & Boike, J. (2018). How the insulating properties of snow affect soil carbon distribution in the continental pan-Arctic area. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(3), 913–925. <https://doi.org/10.1002/2017JG004040>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Hernández-Muñoz, A. E., Hernández-Muñoz, K. M., & Mata-Maqueda, I. (2018). Características, ventajas y limitantes en las variantes metodológicas de los Casos y Controles: Artículo de revisión narrativa. *Revista Digital Ciencia@UAQRO*, 11(1), 110–122. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-91902018000100011
- Hollmann, R., Merchant, C. J., Saunders, R., Downy, C., Buchwitz, M., Cazenave, A., Chuvieco, E., Defourny, P., de Leeuw, G., Forsberg, R., Holzer-Popp, T., Paul, F., Sandven, S., Sathyendranath, S., van Roozendaal, M., & Wagner, W.

- (2013). The ESA climate change initiative: Satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10), 1541–1552. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00254.1>
- Kustas, W. P., & Anderson, M. C. (2009). Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12), 2071–2081. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.05.016>
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00005-2)
- Leuning, R., Denmead, O. T., & Miyata, A. (2012). Sonic anemometer and gas analyzer designs: Their impact on flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.012>
- Mays, N., & Pope, C. (2005). Systematically reviewing qualitative and quantitative evidence to inform management and policy-making in the health field. *Journal of Health Services Research & Policy*, 10(S1), 6–20. <https://doi.org/10.1177/135581960501000107>
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). *Principles of environmental physics* (4th ed.). Academic Press.
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12). <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Methuen.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

- Phillips, O. L., Brien, R. J. W., & Gloor, E. (2019). On the probability of catastrophic Amazon forest dieback. *Nature Communications*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08739-8>
- Pielke, R. A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K. K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P., & de Noblet-Ducoudré, N. (2016). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2068), 20150215. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0215>
- Pérez-Gaxiola, G., & Cuello-García, C. (2015). Medicina basada en la evidencia: Fundamentos y su enseñanza en el contexto clínico. *Pan American Health Care Exchanges*, 15(1), 39–44.
- Popay, J., Roberts, H., Sowden, A., Petticrew, M., Arai, L., Rodgers, M., & Britten, N. (2006). Guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews. *ESRC Methods Programme*, 1–92.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- Stern, C., Jordan, Z., & McArthur, A. (2014). Developing the review question and inclusion criteria. *American Journal of Nursing*, 114(4), 53–56. <https://doi.org/10.1097/01.NAJ.0000445680.67800.86>
- Wang, K., & Dickinson, R. E. (2013). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 51(2), 143–173. <https://doi.org/10.1002/rog.20015>
- Wang, Z., & Li, J. (2017). Comparing the performance of the METRIC and SEBAL models for estimating evapotranspiration under advection conditions. *Irrigation Science*, 35(4), 369–384. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0539-3>