

# Análisis de componentes biofísicos del balance de radiación neta, usando teledetección, en la cuenca hidrográfica de Sorocaba con bosque atlántico intervenido, Brasil

Analysis of net radiation in Atlantic forest affected with anthropic intervention, in São Paulo, Brazil

Argemiro José Moreno Arteaga,\* Manoel Mariano Neto da Silva,\*\* Gabriel Vidal Mota,\*\*\* Salmi Lizzeth Tapia Aguirre\*\*\*\* y Bernardo Barbosa da Silva+

Recibido: 19/09/2020. Aceptado: 30/11/2020. Publicado: 04/03/2021.

**Resumen.** Los ecosistemas forestales, como el bosque atlántico en América del sur, han sido removidos para dar lugar a actividades agropecuarias y asentamiento humanos. Tal situación estaría ocasionando cambios en la absorción de la energía solar en la superficie terrestre, lo que modifica el consumo de radiación neta, que, a su vez, puede influir en la temperatura del aire. Por consiguiente, esta investigación tuvo como objetivo evaluar las alteraciones de la radiación neta en la cuenca hidrográfica de Sorocaba, para analizar cómo el cambio de bosque atlántico por áreas agropecuarias y construcciones antrópicas impacta en la radiación neta y la repercusión que podría estar ocasionando en la regulación del clima local. Para esto fue determinado el balance de radiación en la cuenca y sus componentes biofísicos (NDVI, temperatura superficial, albedo y radiación emitida), por medio del modelo SEBAL, utilizando imágenes OLI/TIRS–Landsat 8 y ASTER(GDEM). Los resultados revelaron que las zonas construidas, seguidas por las agropecuarias, en comparación con la de bosque atlántico, presentan valores de albedo y temperatura superficial superiores, y, consecuentemente, mayores flujos de calor emitido a la atmósfera en forma de radiación infrarroja. Por consiguiente, se generó menores consumo de radiación neta, cuya media para las áreas boscosas, agrícolas, con pastos, suelos desnudos y construidas fue de 712,40Wm<sup>-2</sup>, 669,40Wm<sup>-2</sup>, 629,90Wm<sup>-2</sup>, 616,60Wm<sup>-2</sup> y 524,40Wm<sup>-2</sup>, respectivamente. Así, la deforestación en la cuenca ocasionó que disminuyera la radiación neta y se emita más calor a la atmósfera, lo que favorece el efecto invernadero (principal causante del calentamiento

<sup>\*</sup> Estudiante de Doctorado en Meteorología. Universidad Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande, PB, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4700-3263. Email: argemiro.moreno@ unesp.br

<sup>\*\*</sup> Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil y Ambiental Universidad Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande, PB, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3106-1012. Email: marianop.paiva2@gmail.com

<sup>\*\*\*</sup> Estudiante de Maestría en Meteorología Universidad Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande, PB, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8404-8268. Email: gabrielspacey@ gmail.com

gmail.com \*\*\*\* Investigadora. Universidad Federal de Sao Carlos (UFSCAR), Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Bairro do Itinga, Sorocaba, SP, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4589-9449. Email: salmitapia@gmail.com

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup> Profesor e investigador del Programa de Posgrado en Meteorología. Universidad Federal de Ĉampina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande, PB, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5956-7023. Email: bernardo.silva@ufcg.edu.br

global), en detrimento de poder regular la temperatura del aire.

**Palabras claves:** deforestación, temperatura superficial, efecto invernadero, SEBAL, Landsat 8.

Abstract. Forest ecosystems, such as the Atlantic forest in South America, have been removed to give rise to agricultural activities and human settlement. This situation may be causing changes in the absorption of solar energy on the earth's surface, modifying the consumption of net radiation, which in turn can influence air temperature. Therefore, this research aimed to evaluate the changes in the net radiation of the Sorocaba basin, analyzing how changes in the Atlantic forest, caused by agricultural areas and anthropic constructions, this is impacting on the net radiation and the repercussion in the regulation the local climate. For these purposes, the radiation balance in the basin and its biophysical components (NDVI, surface temperature, al-

### INTRODUCCIÓN

Las selvas tropicales son de los ecosistemas que, a nivel global, presentan más pérdida de su extensión territorial para dar lugar a áreas agropecuarias y construcciones antrópicas (Duguma et al., 2019). Este hecho estaría ocasionando cambios en el consumo de energía solar sobre la superficie terrestre porque la vegetación forestal es capaz de absorber radiación incidente y capturar grandes cantidades de dióxido de carbono (gas de efecto invernadero), para obtener glucosa mediante la fotosíntesis, y también porque dicha vegetación actúa en el ciclo hidrológico a través de la evapotranspiración. De este modo la vegetación interviene en la distribución de energía y masa en el ambiente, contribuyendo en la regulación de la temperatura del aire y, consecuentemente, en las características del clima (Duveiller et al., 2018; Food and Agriculture Organization [FAO], 2018; Shiflett et al., 2017)los líderes mundiales acordaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS.

En los países tropicales como Brasil, los ecosistemas forestales poseen una extensa área con inmensa biodiversidad de especies, lo que les confiere alta importancia a nivel mundial. Selvas como la amazónica, con aproximadamente 4.2 millones de km<sup>2</sup>, y la cubierta de bosque atlántico, con alrededor de bedo and emitted radiation) were determined through the SEBAL model, using OLI / TIRS-Landsat 8 and ASTER (GDEM) images. The results revealed that the built areas, as well as those for agricultural use, present higher albedo and surface temperature values, when it is compared to the Atlantic forest. Thus, these areas present higher heat flux emitted into the atmosphere in the form of infrared radiation. Consequently, lower net radiation consumption was generated, which was 712.40Wm-2, 669.40Wm-2, 629.90Wm-2, 616.60Wm-2 and 524.40Wm-2, on average, for forest, agricultural areas, areas with pastures, bare soils and built areas, respectively. Thus, deforestation in the basin caused the net radiation to decrease and more heat was emitted into the atmosphere, which favors the greenhouse effect (the main cause of global warming), affecting the regulation of the air temperature.

Keywords: deforestation, surface temperature, greenhouse effect, SEBAL, Landsat 8.

0.2886 millones de km<sup>2</sup>, abarcan más del 50% del territorio brasileño (Marques *et al.*, 2016; Wagner *et al.*, 2020)

Sin embargo, originalmente el bosque atlántico en el siglo pasado cubría un vasto territorio por toda la costa del océano atlántico de América del Sur, con un área cercana a los 1.3 millones de km<sup>2</sup>, que han sufrido una deforestación de más del 77%, y que ha dado como resultado una fuerte fragmentación para actividades agrícolas, pecuarias y habitacionales (Benchimol et al., 2017; Marques et al., 2016; Wagner et al., 2020. Esto ha modificado el consumo de radiación neta en la superficie original, es decir, cambiando la cantidad de energía solar utilizada en los procesos metabólicos de la vegetación, como también para calentar el aire, la cobertura terrestre y el agua (Liang et al., 2019; O'Brien y Daigh, 2019). Por tanto, los cambios en el uso y ocupación del suelo con la deforestación del bosque atlántico implica alteraciones del flujo de radiación entre la cobertura terrestre y su atmósfera, lo que impacta en la temperatura de la superficie y del aire, que, a su vez, puede influir en el clima, ya sea a nivel local, regional o global (Duveiller et al., 2018; Shiflett et al., 2017)

Normalmente, la medición de la radiación neta consumida en áreas locales y homogéneas es realizada con instrumentos meteorológicos especializados (radiómetro neto), pero cuando existe la

necesidad de medirla en escala regional no cuenta con el debido soporte porque es muy dependiente a las condiciones de las coberturas. No obstante, en extensas áreas pueden ser determinadas por medio de geoprocesamiento empleando información obtenida con técnicas de teledetección, como así lo formula el modelo SEBAL (por las siglas en inglés de Surface Energy Balance Algorithms for Land). Este modelo matemático hace uso de la radiancia espectral registrada en imágenes de satélite para estimar el balance de radiación neta en la superficie con base a leyes físicas como la de Stefan-Boltzmann y de Planck (Atasever y Ozkan, 2018; Bastiaanssen et al., 1998; Huang et al., 2018; Ndou et al., 2018), por lo que es una metodología comúnmente aceptada, empleada y estandarizada.

Diversos estudios realizados en Brasil han utilizado la metodología SEBAL; de forma representativa, Pavão et al. (2016), en el municipio de Humaitá, perteneciente al estado de Amazonas, y Gusmão et al. (2012) en la Isla fluvial de Bananal, dentro del estado de Tocantins, analizaron la variación de la radiación neta en biomas de sabana tropical cerrada y selva amazónica, empleando imágenes TM-Landsat 5 de 2005, 2009 y 2010. En la cuenca hidrográfica del río Jacaré, localizada entre los estados de Sergipe y Pernambuco, y áreas de riego, situadas en los estados de Paraíba y Bahía, varias investigaciones determinaron la radiación neta en cultivos frutales y agricultura de secano para evaluar el desempeño de sistemas de irrigación agrícola, utilizando para esto imágenes TM-Landsat 5 (de 1999, 2000, 2006 y 2008) y MODIS-Terra/Aqua de 2010 y 2011 (Batista et al., 2013; Pace et al., 2008; Silva et al., 2012). Ya en el estado de São Paulo, Silva et al. (2015), Gomes et al. (2009) y Santos et al. (2015), cuantificaron el balance de radiación en la cuenca hidrográfica de Mogi-Guaçu, sobre coberturas conservadas de ecosistema de cerrado, plantaciones de caña de azúcar y forestal de eucaliptos, para lo cual emplearon imágenes TM-Landsat 5 y MODIS-Terra/Aqua, todas del año 2005; esto en búsqueda de mejorar el monitoreo y planeamiento del recurso hídrico en áreas agrícolas y vegetación nativa.

A nivel internacional existen varias investigaciones hechas en China, Portugal y Taiwán, donde se analizó la distribución espacial de la radiación neta en terrenos cultivados, superficies con nieve, cuerpos de agua, suelos desnudos, pastos, bosques, zonas residenciales y desierto, utilizando imágenes del satélite Landsat 5, 7 y Terra/Aqua (Huang *et al.*, 2018; S. Li y Zhao, 2010; Z. Li *et al.*, 2013; Pôças *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2012).

Los diferentes estudios realizados en Brasil y y en otras regiones fueron desarrollados, principalmente, para obtener información relevante respecto al cuestiones hídricas para cultivos agrícolas, empleando para eso imágenes TM–Landsat 5, ETM–Landsat 7 y MODIS–Terra/Aqua. Por tanto, se confirma que análisis espaciales acerca del balance de radiación neta en la superficie con otros tipos de imagenes no han sido aplicados o se llevaron a cabo de manera limitada, en especial en investigaciones acerca de los impactos generados por la deforestación del bosque atlántico.

La cuenca hidrográfica de Sorocaba ha sufrido deforestación por las actividades agropecuarias y asentamientos antrópicos, pero aún presenta áreas del ecosistema nativo de bosque atlántico en zonas como el Bosque Nacional de Ipanema. Dada su importancia agroecológica y la ausencia de estudios en este tipo de ecosistema, la misma fue considerada para evaluar las alteraciones sufridas en la radiación neta por la modificación en el uso y ocupación del territorio, y comprender cómo las transformaciones del medio ambiente están causando una reducción en la capacidad de regulación del microclima local. Se utilizaron para esto imágenes digitales OLI/ TIRS-Landsat 8, derivadas de la última generación de satélites de la serie Landsat, e imagen ASTER (GDM) del satélite Terra.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### Área de estudio

El área de estudio fue la cuenca hidrográfica de Sorocaba, que tiene 1251.3 km<sup>2</sup>, localiza en el estado de São Paulo, en Brasil (Figura 1).

La cuenca posee como principal corriente hídrica el río Sorocaba y se ubica a una altitud de 638 m sobre el nivel medio del mar, distribuida entre los municipios de Alumínio, Araçoiaba da Serra,



Figura 1. Localización de la cuenca de Sorocaba.

Boituva, Capela do Alto, Iperó, Itu, Mairinque, Porto Feliz, Salto de Pirapora, Sorocaba y Votorantim (Fundação agência de bacias dos rios Sorocaba e médio Tietê [FABH-SMT], 2016).

Sobre la región, conforme la clasificación de Köppen, predomina un clima subtropical con estaciones definidas, siendo la media anual pluviométrica de 1300 mm y, esporádicamente, llegan masas de aires polares que pueden provocar la ocurrencia de bajas temperaturas (Martinelli, 2010). Durante la estación de verano, entre finales de diciembre e inicios de abril, se registran las mayores incidencias de radiación solar, temperaturas y precipitaciones (Scoriza y Piña-Rodrigues, 2014).

La cuenca presenta, básicamente, áreas de bosque atlántico, de uso pecuario, cultivos agrícolas, pequeñas construcciones rurales y el centro urbano de la región metropolitana de Sorocaba. Alberga un área nacional de conservación natural, llamada Bosque Nacional de Ipanema (Figura 1), que ocupa 51.15 km<sup>2</sup> de la cuenca (4.22% de la superficie), con vegetación nativa de bosque atlántico.

#### Imágenes digitales y dato meteorológico

Fue usada una imagen digital del satélite Landsat 8, la cual se registró el 28 de enero de 2019, representativa de la estación climática de verano, época de mayor disponibilidad hídrica y energética para la vegetación. Específicamente, se utilizaron las bandas del sensor OLI y TIRS que aparecen en la Tabla 1 (United States Geological Survey, 2019).

La imagen fue obtenida gratuitamente de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (https://earthexplorer.usgs.gov/), registrada en condiciones meteorológicas de cielo claro, sin errores o distorsiones debido a fallas instrumentales del sensor receptor.

Se empleó también un Modelo Digital de Elevación Global (Global Digital Elevation Map – GDEM), derivado de una imagen ASTER del

Bandas	Espectro electromagnético	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m)	Sensor
2	Azul	0,45 - 0,51	30	OLI
3	Verde	0,53 - 0,59	30	OLI
4	Rojo	0,64 - 0,67	30	OLI
5	Infrarrojo cercano	0,85 - 0,87	30	OLI
6	Infrarrojo de onda corta	1,57 - 1,65	30	OLI
7	Infrarrojo de onda corta	2,11 - 2,29	30	OLI
10	Infrarrojo térmico	10,60 - 11,19	100	TIRS

Tabla 1. Bandas espectrales empleadas de la imagen OLI/TIRS-Landsat 8.

satélite Terra, con resolución espacial de 30 m, de dominio público (https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index\_en.html), que fue puesto a disposición por el Sistema de Observación de Datos de la Tierra y Sistema de Información (Earth Observing System Data and Information System – EOSDIS) de la NASA. Esta imagen representa la elevación topográfica del globo terrestre por encima del nivel medio del mar con alta precisión vertical y horizontal de los elementos geométricos del relieve (Celestino y Philips, 2016).

El dato meteorológico utilizado es la temperatura media horaria de la cuenca en el momento del registro de la imagen digital OLI/TIRS–Landsat 8, que resultó ser de 27.8 °C, medida en la estación automática Sorocaba-A713 del Instituto Nacional de Meteorología (INMET).

# Cálculo de la radiación neta en la superficie de la cuenca

La radiación neta en la superficie de la cuenca – Rn (Wm<sup>-2</sup>) fue determinada con la ecuación (1), según el modelo SEBAL, al contabilizar la radiación solar incidente – RS↓ (Wm<sup>-2</sup>), la radiación de onda larga incidente que es emitida por los gases de la atmósfera – RL↓ (Wm<sup>-2</sup>) y la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre para la atmósfera – RL↓ (Wm<sup>-2</sup>) (Atasever y Ozkan, 2018; Huang et al., 2018; Ndou et al., 2018):

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (1)$$

Siendo  $\alpha$  y  $\varepsilon_o$  (adimensional), respectivamente,

el albedo y la emisividad térmica de la superficie de la cuenca.

La RS $\downarrow$  fue calculada con la siguiente ecuación (Allen et al., 2011; Du et al., 2013; Yang et al., 2018):

$$R_{S\downarrow} = d_r G_{sc} \tau_{sw} \cos\theta \tag{2}$$

Donde  $G_{SC}$  es la constante solar, con valor de 1367 Wm<sup>-2</sup>;  $\tau_{sw}$  es la transmitancia de la atmosfera para días en condiciones de cielo claro (adimensional);  $d_r$  es el inverso del cuadrado de la razón entre la distancia media y absoluta del Sol y la Tierra el día en que fue obtenida la imagen (adimensional), y  $\theta$  representa el ángulo cenital relativo al punto central de la imagen, disponible en el metadatos de la misma.

El  $d_r$  varía de acuerdo al movimiento de translación de la Tierra, cuyo valor es determinado según Iqbal (1983), en función del día secuencial del año ( $d_n$ ):

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right)$$
(3)

La  $\tau_{sw}$  fue determinada con base en la altimetría de la cuenca (*z*), obtenida mediante el modelo digital de elevación de la imagen ASTER (Li y Zhao, 2010; Yang *et al.*, 2018), con la siguiente ecuación:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} z \tag{4}$$

El  $\alpha$  fue calculado por medio de la ecuación 5, la cual corrige los efectos ocasionados por la transmitancia atmosférica (Lan y Liu, 2018; Silva *et al.*, 2015; Tasumi *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2018):

$$\alpha = \frac{\alpha_{TOA} - 0.03}{\tau_{sw}^2} \tag{5}$$

Siendo  $\alpha_{TOA}$  el albedo en el techo de la atmósfera sin correcciones atmosféricas (adimensional), que se calculó según la relación linear de las reflectancias ( $\rho$ ) del espectro de radiación de ondas cortas en la superficie (Silva *et al.*, 2016):

$$\alpha_{TOA} = 0.3\rho_2 + 0.277\rho_3 + 0.233\rho_4 + 0.143\rho_5 + 0.036\rho_6 + 0.012\rho_7 (6)$$

Donde  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$ ,  $\rho_5$ ,  $\rho_6$  y  $\rho_7$  corresponden a las reflectancias en la superficie (adimensional), de las bandas espectrales 2 hasta la 7 de la imagen OLI/TIRS–Landsat 8. Estas reflectividades fueron determinadas con la ecuación 7, a través de la calibración radiométrica de los niveles digitales ( $Q_{cal}$ ) de cada banda, considerando la corrección del ángulo  $\theta$  (United States Geological Survey, 2019):

$$\rho_{\lambda} = \frac{(0,00002)Q_{cal}+0,1}{\sin(\theta)}$$
 (7)

La  $R_{L\downarrow}$  que llega a la superficie de la cuenca se determinó como sigue, de acuerdo con la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \tag{8}$$

Refiriéndose  $\varepsilon_a$  a la emisividad de la atmósfera (adimensional);  $\sigma$  como la constante de Stefan-Boltzmann (igual a 5.67 x 10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>), y  $T_a$  (K) a la temperatura del aire en el momento del registro de la imagen OLI/TIRS–Landsat 8, para lo cual fue definida la temperatura media horaria medida en la estación meteorológica, que se considera representativa para toda la cuenca por su poca extensión y variación altimétrica, con insignificantes cambios en las condiciones ambientales de la atmósfera.

La  $\varepsilon_a$  se obtuvo con  $\tau_{sw}$ , según Allen *et al.* (2011):

$$\varepsilon_a = 0.85 (-\ln \tau_{sw})^{0.09} \tag{9}$$

La *R*<sub>*L*↑</sub> fue también computada a través de la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_S^4 \tag{10}$$

Representando  $\varepsilon_0$  (adimensional) y  $T_S$  (K), respectivamente, la emisividad y temperatura radiométrica de la superficie de la cuenca.

 $\varepsilon_0$  se estimó mediante el Índice de Área Foliar (*LAI*) (Allen *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2015), según la ecuación:

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01 \, LAI$$
 (11)

Esta ecuación (11) es utilizada cuando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) es mayor a cero y el *LAI* menor a tres. Para *LAI* mayor o igual a tres se atribuye la emisividad con valor de 0.98 y para *NDVI* menor que cero en 0.985 (Allen *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2015).

El *NDVI* se determinó por la diferencia de las reflectancias de las bandas espectrales 5 ( $\rho_5$ ) y 4 ( $\rho_4$ ) de la imagen OLI/TIRS–Landsat 8, dividida por la suma de las mismas reflectancias (Barbosa *et al.*, 2017; Rouse *et al.*, 1973), esto es:

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4}$$
(12)

Por otro lado, el *LAI* se calculó a través del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) (Allen *et al.*, 2011; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Papadavid *et al.*, 2013) as they cover large areas and can provide accurate and reliable estimations; intensive field monitoring is also not required, although some ground-truth measurements can be helpful in interpreting satellite images. For the purposes of this paper, modeling and remote sensing techniques were integrated for estimating actual evapotranspiration of groundnuts (Arachishypogaea, L., de esta manera:

$$LAI = -\frac{ln(\frac{0.69-SAVI}{0.59})}{0.91}$$
(13)

Para obtener el SAVI se aplicó la siguiente operación (14) con las reflectancias de las bandas espectrales 5 y 4 (Huete, 1988; Ren *et al.*, 2018):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_5 - \rho_4)}{L + \rho_5 + \rho_4}$$
(14)

Donde L es un factor de corrección que varía entre cero y uno; en la cuenca fue utilizado con valor de 0.25 para área de bosque y 1 en las edificaciones construidas, siendo de 0.5 para las áreas agropecuarias y demás coberturas (Huete, 1988; Papadavid *et al.*, 2013; Pôças *et al.*, 2013)spatial variation in vegetation type and density, and water availability. This is the case for the mountainous areas of northern Portugal, where ancestral irrigated meadows (lameiros.

La  $T_S$  se estimó utilizando la ecuación 15, conforme la ley de Planck, a partir del espectro de radiancia térmica ( $L_{\lambda}$ ) y la respectiva emisividad de cada pixel ( $\varepsilon_{NB}$ ) en el dominio de ese espectro (United States Geological Survey, 2019):

$$T_{s} = \frac{1321,08}{\ln\left(\frac{774,88\ (\mathcal{E}_{NB})}{L_{2}}+1\right)} \tag{15}$$

La  $\varepsilon_{NB}$  se determinó mediante el *LAI* utilizando la ecuación 16, pero solo para cuando el *NDVI* es mayor a cero y *LAI* menor a tres (Allen *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2015):

$$\varepsilon_0 = 0.97 + 0.01 \, LAI$$
 (16)

Para *LAI* mayor o igual a tres, la  $\varepsilon_{NB}$  se consideró con valor igual a 0.98 y para *NDVI* menor que cero en 0.99 (Allen *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2015).

La  $L_{\lambda}$  (Wm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>µm<sup>-1</sup>) fue obtenida por rectificación radiométrica de los niveles digitales de los pixeles ( $Q_{cal}$ ) de la banda 10 (banda térmica) de la imagen OLI/TIRS–Landsat 8 (United States Geological Survey, 2019), con la ecuación 17:

$$L_{\lambda} = (0,0003342)Q_{cal} + 0,1 \tag{17}$$

Todo este procesamiento matemático para calcular el balance de radiación neta de la superficie y sus componentes biofísicos (NDVI, temperatura superficial, albedo y radiación emitida), fue desarrollado con la herramienta Model Builder del software ArcGis 10.4. *1*. El procedimiento incluye correcciones radiométricas con la calibración de cada banda espectral del sensor OLI por medio de la ecuación 7 y rectificación de la banda del sensor TIRS con la ecuación 17. Además, considera interferencias atmosféricas con el cómputo del albedo con la ecuación 5. Asimismo, las actividades de proyecciones geográficas de la imagen fueron realizadas en ArcGis.

# Mapas de coberturas de la cuenca hidrográfica

También la imagen OLI/TIRS–Landsat 8 se utilizó para caracterizar las coberturas de la cuenca mediante el método de clasificación supervisado de Máxima Verosimilitud (Liang et al., 2020; Shi y Xue, 2017), a través del software ArcGis 10.4.1. Con el cual se realizó un mapa temático de ocupación de la cuenca mediante la definición de varias áreas de muestreo o entrenamiento que eran representativas para cada una de las coberturas. Al final, cada cobertura clasificada fue constatada en campo con varios puntos de observación, para verificar la eficacia del método y poder efectuar las debidas correcciones en el establecimiento de las áreas de entrenamiento.

# Análisis de los componentes del balance de radiación neta

Con muestras de áreas de las diferentes coberturas clasificadas de la cuenca, a través de gráficos de diagrama de caja realizados con el software R 3.6.2, se compararon los valores mínimos, centrales y máximos del NDVI, temperatura superficial, albedo, radiación emitida y radiación neta. Además, igualmente con el programa R se analizaron las interrelaciones existentes entre estas variables a través del método de Spearman y Análisis de Componentes Principales para evaluar cómo se comporta la radiación neta con la modificación de las características biofísicas de la superficie.

Siendo el método de Spearman una técnica de análisis de la correlación entre dos variables mediante un coeficiente que varía de 1 (alta correlación positiva) a -1 (alta correlación negativa) y denotando cero (0) relación nula, resulta apropiado para aplicar en relaciones continuas o discretas, con configuraciones lineales o no lineales (Glantz, 2015). Por otro lado, la PCA es utilizada para evaluar las correlaciones simultáneamente entre diversas variables que son representadas en dimensiones formuladas a partir de la combinación de las mismas, para tener una visualización espacial conjunta de sus relaciones (Naik, 2018).

# **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### Ocupación de la cuenca hidrográfica

En la Figura 2 se observa el mapa temático que caracteriza la ocupación espacial de la cuenca de Sorocaba, donde se diferencia a lo largo del territorio plantaciones agrícolas (entre las cuales está la soya, caña de azúcar, maíz, café, arroz, naranja, frijol, algodón, plátano, tomate, etc.), que suman 596.89 km<sup>2</sup>, siendo el 47.70% del total de la superficie hidrográfica. Las áreas con pastos para

uso pecuario, que están integradas por diferentes especies herbáceas, suman 211.31 km<sup>2</sup>, lo que representa el 16.88% del territorio.

Las construcciones antrópicas (Figura 2) abracan 191.26 km<sup>2</sup> (15.28%), conformadas por pequeñas edificaciones rurales y urbanas (como casas, graneros, invernaderos, establos, edificios, vías, industrias, etc.).

La cobertura forestal suma la totalidad de 144.78 km<sup>2</sup>, que corresponde al 11.57% de la cuenca, las cuales son áreas de bosque atlántico que se caracterizan como selva húmeda tropical y subtropical, localizadas en el Bosque Nacional de Ipanema y fragmentos forestales dispersos por toda la cuenca (Figura 2).

En menor proporción fueron identificados los suelos desnudos (Figura 2), con 55.67 km<sup>2</sup>, es decir, 4.45% de la cuenca, resultantes por las inadecuadas actividades agropecuarias, como sobrepastoreo y



Figura 2. Mapa de ocupación territorial de la cuenca de Sorocaba para el 28/01/2019.

labrado o arado excesivo, que causaron remoción total de la vegetación. Y los cuerpos de agua que abarcan el 51.57 km<sup>2</sup> (4,12%), estando distribuidos de forma irregular por el territorio.

De forma general, está región hídrica presenta ocupación desordenada del territorio causada por la fuerte intervención antrópica, preservando las características ambientales nativas en las fracciones de bosque atlántico existentes.

Variables biofísicos del balance de radiación neta en la superficie

En el mapa de NDVI (Figura 3) se pueden observar los valores máximos del índice (en verde oscuro) asociados a la alta densidad y vigor de la cobertura vegetal. Las zonas con menor densidad o ausencia de vegetación, están relacionadas con los valores mínimos NDVI (tonalidades rojas y rojo oscuro).

En la Figura 4 está representado el gráfico de diagrama de caja, que compara los valores mínimos,



Figura 4. Valores de NDVI.



Figura 3. Mapa de NDVI de la cuenca de Sorocaba para el 28/01/2019.

centrales (mediana) y máximos de NDVI, entre las diferentes coberturas de la cuenca.

En el anterior gráfico, el bosque atlántico presenta una alta mediana o valor central de NDVI (0.819), así que esta cobertura tiene elevado consumo de radiación solar mediante los procesos de transpiración y fotosíntesis. Las áreas agrícolas y pastoriles (diferentes tonalidades de verde en la Figura 3), presentan valores centrales de 0.718 y 0.670 (Figura 4), por lo tanto, la absorción de la luz solar es inferior en comparación con la floresta atlántica. Pero las coberturas agropecuarias tienen amplitudes superiores entre el valor mínimo y máximo de NDVI, como también la variabilidad entre el cuartil superior e inferior, siendo entonces el consumo de energía solar menos uniforme que en la zona boscosa, lo que indica que los cultivos y pastos varían mucho en tipo de especie y tamaño.

Los suelos desnudos y las construcciones antrópicas, en relación a las demás coberturas, presentan los inferiores valores centrales de NDVI, siendo de 0.33 y 0.15; estas magnitudes están asociadas a las respuestas espectrales de los diferentes materiales y minerales presentes, pero el valor máximo resultante en las construcciones (0.46) puede ser resultante de pequeña zonas verdes dentro del área urbana.

Por otro lado, en la Figura 5 está representada la distribución espacial de la temperatura superficial de la cuenca y en la Figura 6 la comparación de los valores resultantes para las diferentes coberturas.

Evidentemente, las construcciones antrópicas y los suelos desnudos poseen las máximas temperaturas superficiales, como también las superiores amplitudes térmicas (Figura 6). La cobertura forestal presenta el menor rango de temperatura de la cuenca, siendo la mínima de 25.56 °C y la máxima de 28.86 °C, intervalo que es de inferior magnitud que la mínima obtenida por las construcciones antrópicas (31.36 °C), suelo desnudos (29.39 °C) y hasta en los pastos (29.58 °C). El área agrícola es la



Figura 5. Mapa de temperatura superficial de la cuenca de Sorocaba para el 28/01/2019.



Figura 6. Valores de temperatura superficial.

zona con características térmicas más semejante con la zona boscosa, pero con mayor amplitud térmica.

Estas diferencias de temperatura entre las coberturas están relacionadas directamente con la interacción biofísica que tienen con la radiación solar incidente. En el bosque atlántico la luz que llega es consumida en gran proporción por los procesos biológicos, pero en las construcciones la energía es absorbida por sus materiales (asfalto, concreto, vidrios, metales, tejas, etc.), almacenando calor, con la consecuente elevación de su temperatura superficial (Estoque *et al.*, 2017; Gage y Cooper, 2017; Shiflett *et al.*, 2017).

Referente al albedo de la cuenca, en la Figura 7 se puede visualizar los porcentajes de radiación solar que son reflejados de regreso a la atmósfera.

En general, las coberturas exhiben albedos que varían de 5 a 30% (Figura 8), excepto en las construcciones que denotan valores significativamente



Figura 7. Mapa de albedo de la cuenca de Sorocaba para el 28/01/2019.



Figura 8. Valores de albedo.

superiores (entre 13.18 y 79.97%). Resulta notable (Figura 8) cómo las edificaciones antrópicas con 24.76%, duplicaron la proporción numérica central de energía solar reflejada por la zona boscosa que fue de 11.92%, que es la cobertura con inferiores valores de albedo (entre 6.31 y 15.29%). También, la amplitud entre el mínimo y máximo valor de reflexión es superior en las construcciones, correspondiente a la heterogeneidad de las propiedades físicas de los variados materiales constituyentes (Baldinelli *et al.*, 2017).

El albedo de los pastos es parecido al de los suelos desnudos (Figura 8), lo que indica degradación de la vegetación herbácea. En cambio las áreas agrícolas tienen valores semejantes al bosque atlántico por la existencia de cultivos con características arbustivas, como las plantaciones de café y cítricos.

Referente a la energía emitida por la cuenca en dirección a la atmósfera, en la Figura 9 está exhibida



Figura 9. Mapa de radiación infrarroja emitida por la cuenca de Sorocaba para el 28/01/2019.

la cantidad de radiación de onda larga o infrarroja producida por las coberturas.

En la Figura 10 se puede verificar que las construcciones y los suelos desnudos son las áreas con las mayores emisiones de radiación infrarroja, disminuyendo gradualmente en las zonas pecuarias, agrícolas y forestales.

Biológicamente, la vegetación boscosa consume energía solar para la producción de compuestos orgánicos a partir de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua e impide, en comparación con las otras coberturas, el incremento de la temperatura superficial (Figura 6), lo que da como resultado emisiones de radiación a la atmósfera inferiores. Por otro lado, los materiales de las edificaciones construidas y minerales de los suelos descubiertos, absorben la radiación solar, produciendo aumento de su temperatura superficial y, consecuentemente, producen más calor en forma de radiación infrarroja.

Esta radiación liberada, desde el punto de vista climático, es de extrema importancia, puesto que las ondas infrarrojas son absorbidas por gases atmosféricos (como el CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>), entre otros), lo que intensifica el efecto invernadero, que es el principal causante del calentamiento global (Ghosh y Behera, 2018; O'Brien y Daigh, 2019; Vahedi, 2016)total height (H).

### Radiación neta en la superficie de la cuenca de Sorocaba

Al contabilizar el flujo de radiación solar y atmosférica incidente en la cuenca, con la reflejada y emitida por la superficie, se obtiene el balance de radiación neta (Figura 11).

Los valores medios aritméticos de radiación neta estimado para las áreas boscosas, agrícolas, pastos, suelos desnudos y edificaciones fueron, respectivamente, de 712.40 Wm<sup>-2</sup>, 669.40 Wm<sup>-2</sup>, 629.90 Wm<sup>-2</sup>, 616.60 Wm<sup>-2</sup> y 524.40 Wm<sup>-2</sup>. Estos valores promedios son semejantes a las medianas determinadas (Figura 12), excepto en las construcciones (con 536.8 Wm<sup>-2</sup>), donde los valores extremos distorsionaron la media.

Tomando como referencia el bosque atlántico, que es la cobertura nativa de la cuenca, se puede verificar, según la media y la mediana, que las



Figura 10. Valores de radiación emitida.

zonas agrícolas disminuyeron la radiación neta consumida en 6.10%, los pastos en 11.5%, los suelos desnudos en 13.4% y en las construcciones hasta en 24.6% según la mediana y 26.3% con base a la media. Así, en estas proporciones, al haber disminuido el vigor y densidad vegetal en la superficie (como indicó el NDVI en la Figura 3), fue reducida la capacidad de la cuenca de consumir radiación solar a través de los procesos de fotosíntesis y evapotranspiración; energía solar que pasa a ser absorbida por la superficie, elevando su temperatura y, consecuentemente, incrementando la temperatura del aire adyacente por la transferencia de calor mediante mecanismos de conducción y radiación térmica (Estoque et al., 2017). Luego, el calor es distribuido por toda la atmósfera por proceso de convección y advección del aire.

Por este motivo, los cambios en el paisaje debido a la sustitución del bosque atlántico por las otras coberturas, especialmente las construcciones antrópicas, estarían propiciando el aumento de la temperatura superficial y del aire de la cuenca.

De este modo, los cambios en el uso y ocupación de la cuenca están alterando el flujo de energía y masa en la superficie, interrumpiendo la transformación de radiación solar en energía química, que es introducida a la cadena trófica por la vegetación que actúa como productor primario del ecosistema.



Figura 11. Mapa de radiación neta de la cuenca de Sorocaba para el 28/01/2019.

La radiación neta en la superficie, según algunos autores reconocidos a nivel internacional, varía comúnmente entre 100 a 800 Wm<sup>-2</sup>, dependiendo de la localización en el planeta y del tipo de cobertura (Allen *et al.*, 2002, 2011; Z. Li *et al.*, 2013; Pôças *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2015): En esta investigación, los valores encontrados variaron entre 124.2 Wm<sup>-2</sup> (mínimo valor presentado en las construcciones), hasta 764.5 Wm<sup>-2</sup> (máximo valor presentado en los bosques), como se puede visualizar en la Figura 12.

Hemos comparado nuestros resultados con otras investigaciones que también utilizaron la metodología SEBAL en Brasil (Pavão *et al.*, 2016), en áreas de selva amazónica degradada del municipio de Humaitá, al sur del estado de Amazonas, utilizando imágenes TM – Landsat 5 de 2010. Estimaron la radiación neta con un valor medio de 565 Wm<sup>-2</sup>, pero obtuvieron magnitudes por encima de los 600 Wm<sup>-2</sup>, y en la zona urbana del



Figura 12. Valores de radiación neta.

mismo municipio un promedio de 500 Wm<sup>-2</sup>; no obstante, encontraron recurrentes valores por debajo de los 300 Wm<sup>-2</sup>. Por otro lado, igualmente con imágenes TM-Landsat 5, pero de 2005, Gusmão et al. (2012), en la Isla fluvial de Bananal, que se ubica en el estado de Tocantins, determinaron valores superiores a 575 Wm<sup>-2</sup> en áreas con selva amazónica y sabana de cerrado e inferiores a 425 Wm<sup>-2</sup> en porciones alteradas por intervención antrópica. Asimismo, Batista et al. (2013), mediante el uso de imágenes TM - Landsat 5 de 1999 y 2006, registraron en la cuenca hidrográfica del río Jacaré que se encuentra en el estado de Sergipe, valores superiores a 640.0 Wm<sup>-2</sup> en cobertura de bosque de caatinga e inferiores a 402.0 Wm<sup>-2</sup> en zonas desprovistas de vegetación.

Utilizando imágenes MODIS de los años 2010 y 2011, con resolución espacial de 1 km, Oliveira *et al.* (2015), en la cuenca hidrográfica del río Tapacurá en el estado de Pernambuco, calcularon la radiación neta entre 380 a 720 W m<sup>-2</sup>, siendo los valores superiores en remanentes de vegetación de caatinga y los inferiores en zonas urbanas y suelos desnudos.

En locales más próximos a la presente área de estudio, Santos et al. (2015), sobre la cuenca hidrográfica del río Mogi-Guaçu en el estado de São Paulo, usando imágenes MODIS de 2005, determinaron el balance de radiación entre 398.4 a 801.4 Wm<sup>-2</sup>, siendo los mínimos valores en superficies de concreto y los máximos en coberturas boscosas de cerrado y, seguidamente, plantaciones de caña de azúcar. Además, en la cuenca de Mogi-Guaçu, Silva et al. (2015), utilizando imágenes digitales TM-Landsat 5, estimaron la radiación neta entre 220.4 Wm<sup>-2</sup> a 760.0 Wm<sup>-2</sup>, donde las magnitudes inferiores fueron relacionadas a los suelos desnudos y a la agricultura de caña de azúcar, y las superiores a la vegetación leñosa de cerrado y en plantaciones de eucalipto.

Los valores de radiación neta obtenidos en esta investigación coinciden en diferentes proporciones con los anteriores estudios referenciados y destaca que todas presentan la misma tendencia: la radiación neta consumida es superior en coberturas con más vigor y densidad vegetal e inferior en las afectadas con intervención antrópica. En la Figura 13 se pueden ver las correlaciones de la radiación neta y las variables biofísicas de las coberturas analizadas previamente (pueden observarse los coeficientes de correlación de Spearman y los gráficos de dispersión de valores, entre las variables, en la parte superior derecha e inferior izquierda de la matriz, respectivamente, y en diagonal los histogramas de distribución de cada variable), a fin de examinar cómo las alteraciones de las característica de la superficie terrestre afectan el balance de radiación.

Considerando el NDVI con relación al albedo, estas variables exhiben una correlación exponencial estrictamente decreciente con un coeficiente de dependencia de -0.753 (Figura 13). De esta forma, en la tendencia en que gradualmente aumentan los valores de NDVI, la reflexión de la radiación solar disminuye rápidamente. Así, en la medida en que se vuelve más densa la vegetación en las áreas agropecuarias y el bosque atlántico (incrementando el NDVI), el albedo disminuye. Igualmente, cuando el NDVI aumenta, decrece la temperatura y la radiación infrarroja emitida por la superficie, pero estas variables muestran relaciones lineares inversamente proporcionales, con coeficientes de correlación de -0.921 y -0.876 (Figura 13).

La temperatura superficial y la radiación emitida presentan crecimiento directamente proporcional con fuerte relación de 0.99 (Figura 13), esto debido a que la radiación emitida por un cuerpo es proporcional a su temperatura superficial con base en lo establecido en la ley de Stefan-Boltzmann, como se manifiesta en la Ecuación 10. Por esta razón, cuanto más elevada es la temperatura de la superficie en la cuenca, superior es la radiación infrarroja emitida a la atmósfera, como ocurre en las áreas construidas y suelos desnudos y contrariamente a lo que sucede en la floresta de bosque atlántico, que alcanza las temperaturas mínimas.

El albedo, en relación a la temperatura y la radiación emitida, expresa fuertes correlaciones, de 0,.41 y 0.874 (Figura 13). Tales dependencias se asemejan a una forma logarítmica estrictamente creciente, por consiguiente, cuando el albedo se incrementa levemente en las construcciones an-



Figura 13. Matriz de correlación de la radiación neta y variables influyentes.

trópicas y los suelos desnudos, la temperatura y la emisión aumentan significativamente.

Se constanta también (Figura 13), que la radiación neta tiene fuerte relación positiva con el NDVI (coeficiente de 0.835), interdependencia que es de forma logarítmica estrictamente creciente. De este modo, en la medida en que disminuye la densidad y vigor de la cobertura vegetal, existe la tendencia a reducir sustancialmente el balance de radiación en la superficie.

Con respecto al albedo, la radiación neta muestra una correlación muy fuerte (-0.980), pero de forma lineal inversamente proporcional, de tal forma que, al aumentar la reflexión en la superficie, la radiación neta disminuye simétricamente (Figura 13). Por ello, conforme se aumenta el albedo con la deforestación del bosque atlántico, la radiación neta consumida baja proporcionalmente.

Semejante al albedo, la temperatura y la radiación emitida por la superficie denotan correlación muy fuerte con la radiación neta, con respectivos coeficientes de -0,916 y -0,937, no obstante, la reciprocidad es de manera exponencial estrictamente decreciente (Figura 13). Por eso, al aumentar progresivamente estas dos variables, el balance de radiación decrece súbitamente.

Aún para analizar las interrelaciones entre la radiación neta con las variables influyentes de la superficie, en la Figura 14 se muestra la proyección gráfica bidimensional de la primera (CP1) y segunda componentes (CP2) del método de PCA (donde la radiación neta y las variables biofísicas están representadas con flechas, según sus valores). Lo anterior da como resultado un mapa perceptual bidimensional (Figura 14), que explica la variabilidad de los datos en 78.83% y 17.44%, respectivamente, en términos de sus dimensiones CP1 y CP2, para un total de 96.27% de representación de la variables.

En la Figura 14 (considerando que, a menor



Figura 14. PCA de la radiación neta y variables influyentes.

ángulo entre las flechas, la correlación aumenta, y viceversa), se puede observar claramente el albedo siendo la principal variable que negativamente o inversamente se correlaciona con la radiación neta y, al mismo tiempo, con la que más se contribuye o correlaciona positivamente es con el NDVI. También, la temperatura superficial y la radiación emitida, que tienen fuerte interdependencia entre sí, tienen alta correlación negativa con el NDVI y la radiación neta.

Conforme lo evaluado en las Figuras 13 y 14, las áreas con menos vigor y densidad de cobertura vegetal (valores mínimos de NDVI), presentan valores de albedo superiores, temperatura superficial, radiación emitida y, por consiguiente, menores consumo de radiación neta. Así, el bosque atlántico, mediante el proceso de síntesis biológica, consume radiación solar e impide que la temperatura superficial se eleve al mismo grado que en las otras coberturas donde la luz incidente es absorbida para calentar la superficie y, consecuentemente, emiten más cantidad de flujo de calor a la atmósfera, lo que favorece el efecto invernadero. Por lo tanto, la deforestación del bosque atlántico disminuye el consumo de radiación neta en la cuenca, en detrimento de poder regular la temperatura del aire, lo que puede traer incomodidad térmica, sobre todo en los centros urbanos.

### CONCLUSIONES

Con esta investigación se observa que los cambios en el uso y ocupación del territorio están provocando modificaciones en el consumo de radiación solar incidente, lo que altera el balance de radiación neta en la superficie terrestre, lo que puede impactar en las condiciones térmicas del aire.

En la cuenca de Sorocaba se identificaron las áreas construidas y agropecuarias, en relación con el bosque atlántico, con aumento de la temperatura superficial y, por consiguiente, incremento de la radiación de onda longa (energía térmica o calorífica) emitida a la atmósfera. En contrapartida, la foresta atlántica presenta superior consumo de radiación solar, que es aprovechada como energía química para la producción de materia orgánica. Por tal motivo, la disminución de la densidad y vigor de la cobertura vegetal, ocasionada por la sustitución de las áreas boscosas por construcciones urbanas y agropecuarias, está contribuyendo al calentamiento superficial de la cuenca, aumentando la transferencia de calor a la atmósfera, lo que elevaría la temperatura del aire en el microclima local por el efecto invernadero. Condición que podría estar favoreciendo con la ocurrencia del calentamiento global, al considerar que esta situación está ocurriendo en toda el área deforestada del bosque atlántico, como también en otros ecosistemas forestales que han sufrido procesos de degradación.

De este modo, se destaca la importancia de las interacciones entre las propiedades biológicas de la vegetación con la energía solar para la gestión integrada de cuencas hidrográficas, en el sentido de promover directrices destinadas a la mitigación de impactos ambientales con el ordenammiento y uso eficiente del territorio.

De una manera general, la metodología empleada puede contribuir con estudios dirigidos a la conservación sustentable de ecosistemas selváticos para mantener el equilibrio climático.

# REFERENCIAS

Allen, R. G., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M. H., Bastiaanssen, W. G. M., y Kjaersgaard, J. (2011).

Análisis de componentes biofísicos del balance de radiación neta...

Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, *25*(26), 4011–4027. https://doi.org/10.1002/hyp.8408

- Allen, R. G., Tasumi, M., y Trezza, R. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation (1st ed.). The Idaho Department of Water Resources.
- Atasever, U. H., y Ozkan, C. (2018). A New SEBAL Approach Modified with Backtracking Search Algorithm for Actual Evapotranspiration Mapping and On-Site Application. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(8), 1213–1222. https://doi.org/10.1007/ s12524-018-0816-9
- Baldinelli, G., Bonafoni, S., y Rotili, A. (2017). Albedo Retrieval from Multispectral Landsat 8 Observation in Urban Environment: Algorithm Validation by in situ Measurements. *IEEE Journal of Selected Topics* in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10(10), 4504–4511. https://doi.org/10.1109/ JSTARS.2017.2721549
- Barbosa, A. H. D. S., Carvalho, R. G. de, y Camacho, R. G. V. (2017). Aplicação do NDVI para a Análise da Distribuição Espacial da Cobertura Vegetal na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte. *Geography Department University of Sao Paulo*, 33, 128–143. https://doi.org/10.11606/ rdg.v33i0.128171
- Bastiaanssen, W. G. M., Meneti, M., Feddes, R. A., y Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1: Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6
- Batista, W. R. M., Netto, A. O. A., Silva, B. B. da, Sousa, A. I. F., y Vasco, A. N. (2013). Determinação do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré, Sergipe. *Scientia Plena*, 9(4), 1–10. https://www.scientiaplena.org.br/ sp/article/view/1102/724
- Benchimol, M., Talora, D. C., Mariano-Neto, E., Oliveira, T. L. S., Leal, A., Mielke, M. S., y Faria, D. (2017). Losing our palms: The influence of landscape-scale deforestation on Arecaceae diversity in the Atlantic forest. *Forest Ecology and Management*, 384, 314–322. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.014
- Celestino, V. da S., y Philips, J. W. (2016). Avaliação altimétrica SRTM e ASTER GDEM em áreas de relevos diferenciados. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(1), 15–42.
- Du, J., Song, K., Wang, Z., Zhang, B., y Liu, D. (2013). Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast

China. *Chinese Geographical Science*, 23(1), 73–91. https://doi.org/10.1007/s11769-013-0587-8

- Duguma, L., Atela, J., Minang, P., Ayana, A., Gizachew, B., Nzyoka, J., y Bernard, F. (2019). Deforestation and Forest Degradation as an Environmental Behavior: Unpacking Realities Shaping Community Actions. *Land*, 8(26), 1–17. https://doi.org/10.3390/ land8020026
- Duveiller, G., Hooker, J., y Cescatti, A. (2018). The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 9(1), 1–12. https:// doi.org/10.1038/s41467-017-02810-8
- Estoque, R. C., Murayama, Y., y Myint, S. W. (2017). Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 577, 349–359. https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2018). El Estado de los bosques del mundo - Las Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. In *Fao* (Issues 978-92-5-130715–1). CC BY-NC-SA 3.0 IGO. http://www.fao.org/publications/es
- Fundação agência de bacias dos rios Sorocaba e médio Tietê [FABH-SMT]. (2016). Plano de Bacia Hidrográfica 2016-2027. Agência SMT. www.agenciasmt. com.br/paginas.aspx?pag=PlanoBacias
- Gage, E. A., y Cooper, D. J. (2017). Urban forest structure and land cover composition effects on land surface temperature in a semi-arid suburban area. Urban Forestry and Urban Greening, 28, 28–35. https://doi. org/10.1016/j.ufug.2017.10.003
- Ghosh, S. M., y Behera, M. D. (2018). Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, *96*, 29–40. https://doi. org/10.1016/j.apgeog.2018.05.011
- Glantz, S. A. (2015). *Princípios de Bioestatística* (7th ed.). AMGH Editora Ltda.
- Gomes, H. B., Silva, B. B. da, Cavalcanti, E. P., y Rocha, H. R. da. (2009). Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. *Geociências*, 28(2), 153–164.
- Gusmão, A. C. V. L., Silva, B. B. da, Montenegro, S. M. G. L., y Galvíncio, J. D. (2012). Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, 16(10), 1107–1114. https:// doi.org/10.1590/S1415-43662012001000011
- Huang, L., Zhai, J., Sun, C. Y., Liu, J. Y., Ning, J., y Zhao, G. S. (2018). Biogeophysical forcing of land-use changes on local temperatures across different climate regimes in China. *Journal of Climate*,

Análisis de componentes biofísicos del balance de radiación neta...

*31*(17), 7053–7068. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0116.1

- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. https://doi.org/http://dx.doi. org/10.1016/0034-4257(88)90106-X
- Iqbal, M. (1983). An Introduction to Solar Radiation (1st ed.). Academic Press. https://www.elsevier. com/books/an-introduction-to-solar-radiation/ iqbal/978-0-12-373750-2
- Lan, Z., y Liu, Y. (2018). Study on Multi-Scale Window Determination for GLCM Texture Description in High-Resolution Remote Sensing Image Geo-Analysis Supported by GIS and Domain Knowledge. *International Journal of Geo-Information*, 7(175), 1–24. https://doi.org/10.3390/ijgi7050175
- Li, S., y Zhao, W. (2010). Satellite-based actual evapotranspiration estimation in the middle reach of the Heihe River Basin using the SEBAL method. *Hydrological Processes*, 24(23), 3337–3344. https:// doi.org/10.1002/hyp.7748
- Li, Z., Liu, X., Ma, T., Kejia, D., Zhou, Q., Yao, B., y Niu, T. (2013). Retrieval of the surface evapotranspiration patterns in the alpine grassland-wetland ecosystem applying SEBAL model in the source region of the Yellow River, China. *Ecological Modelling*, 270, 64–75. https://doi.org/10.1016/j. ecolmodel.2013.09.004
- Liang, S., Cheng, J., y Zhang, J. (2020). Maximum likelihood classification of soil remote sensing image based on deep learning. *Earth Sciences Research Journal*, 3(24), 357–365. https://doi.org/doi.org/10.15446/ esrj.v24n3.89750
- Liang, S., Wang, D., He, T., y Yu, Y. (2019). Remote sensing of earth's energy budget: synthesis and review. *International Journal of Digital Earth*, 12(7), 737–780. https://doi.org/10.1080/17538947.201 9.1597189
- Marques, A. A. B. de, Schneider, M., y Peres, C. A. (2016). Human population and socioeconomic modulators of conservation performance in 788 Amazonian and Atlantic Forest reserves. *PeerJ*, 7, 1–28. https://doi.org/10.7717/peerj.2206
- Martinelli, M. (2010). Člima do Estado de São Paulo. *Confins*, 1(8), 1–17. https://doi.org/10.4000/confins.6348
- Naik, G. R. (2018). Advances in Principal Component Analysis: Research and Development (G. R. Naik (ed.); 1st ed.). Springer Singapore. https://doi. org/10.1007/978-981-10-6704-4
- Ndou, N. N., Palamuleni, L. G., y Ramoelo, A. (2018). Modelling depth to groundwater level using SEBALbased dry season potential evapotranspiration in the upper Molopo River Catchment, South Afri-

ca. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21(3), 237–248. https://doi.org/10.1016/j. ejrs.2017.08.003

- O'Brien, P. L., y Daigh, A. L. M. (2019). Tillage practices alter the surface energy balance – A review. *Soil and Tillage Research*, *195*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j. still.2019.104354
- Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., Silva, B. B. da, y Moura, A. E. S. S. de. (2015). Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(1), 16–28. https://doi.org/http:// dx.doi.org/10.1590/0102-778620130652
- Pace, F. T. D., Silva, B. B. da, Silva, V. de P. R. da, y Silva, S. T. A. da. (2008). Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(4), 385–392. https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400009
- Papadavid, G., Hadjimitsis, D. G., Toulios, L., y Michaelides, S. (2013). A Modified SEBAL Modeling Approach for Estimating Crop Evapotranspiration in Semi-arid Conditions. *Water Resources Management*, 27(9), 3493–3506. https://doi.org/10.1007/ s11269-013-0360-x
- Pavão, V. M., Querino, C. A. S., Beneditti, C. A., Pavão, L. L., Querino, J. K. A. da S., Machado, N. G., y Biudes, M. S. (2016). Variação espacial e temporal do saldo de radiação superficial em uma área do sul do Amazônas, Brasil. *RA'E GA - O Espaco Geografico Em Analise*, 37, 333–352. https://doi.org/10.5380/ raega.v37i0.42469
- Pôças, Ī., Cunha, M., Pereira, L. S., y Allen, R. G. (2013). Using remote sensing energy balance and evapotranspiration to characterize montane landscape vegetation with focus on grass and pasture lands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1), 159–172. https://doi.org/10.1016/j. jag.2012.08.017
- Ren, H., Zhou, G., y Zhang, F. (2018). Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 209(79), 439–445. https://doi.org/10.1016/j. rse.2018.02.068
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schel, J. A., y Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. In *Texas: University Remote Sensing Center*. Progress Report RSC.
- Santos, F. A. C., Santos, C. A. C. dos, Silva, B. B. da, Araújo, A. L., y Cunha, J. E. D. B. (2015). Desempenho de metodologias para estimativa do saldo de radiação a partir de imagens MODIS. *Revista Bra-*

*sileira de Meteorologia, 30*(3), 295–306. https://doi. org/10.1590/0102-778620130085

- Scoriza, R. N., y Piña-Rodrigues, F. C. M. (2014). Influência da precipitação e temperatura do ar na produção de serapilheira em trecho de floresta estacional em Sorocaba, SP. In *Floresta* (Vol. 44, Issue 4). https:// doi.org/http://dx.doi.org/10.5380/rf.v44i4.34274
- Shi, X., y Xue, B. (2017). Parallelizing maximum likelihood classification on computer cluster and graphics processing unit for supervised image classification. *International Journal of Digital Earth*, 10(7), 737–748. https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1251502
- Shiflett, S. A., Liang, L. L., Crum, S. M., Feyisa, G. L., Wang, J., y Jenerette, G. D. (2017). Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus. *Science of the Total Environment*, 579, 495–505. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.069
- Silva, B. B. da, Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M. de, Galvíncio, J. D., y Montenegro, S. M. G. L. (2012). Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 47(9), 1218–1226. https://doi. org/10.1590/S0100-204X2012000900006
- Silva, B. B. da, Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M. de, Montenegro, S. M. G. L., y Junior, B. B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 3–8. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8
- Silva, B. B. da, Montenegro, S. M. G. L., Silva, V. de P. R. da, Rocha, H. R. da, Galvíncio, J. D., y Oliveira, L. M. M. de. (2015). Determination of instantaneous and daily net radiation from TM - Landsat 5 data in a subtropical watershed. *Journal of Atmospheric and*

Solar-Terrestrial Physics, 135, 42-49. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.020

- Tasumi, M., Allen, R. G., y Trezza, R. (2008). At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal* of Hydrologic Engineering, 13(2), 51–63. https://doi. org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51)
- United States Geological Survey. (2019). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. In *Nasa* (5th ed., Vol. 5). USGS Landsat User Services. https://landsat.usgs. gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf
- Vahedi, A. A. (2016). Artificial neural network application in comparison with modeling allometric equations for predicting above-ground biomass in the Hyrcanian mixed-beech forests of Iran. *Biomass* and Bioenergy, 88, 66–76. https://doi.org/10.1016/j. biombioe.2016.03.020
- Wagner, F. H., Sanchez, A., Aidar, M. P. M., Rochelle, A. L. C., Tarabalka, Y., Fonseca, M. G., Phillips, O. L., Gloor, E., y Aragão, L. E. O. C. (2020). Mapping Atlantic rainforest degradation and regeneration history with indicator species using convolutional network. *PloS One*, 15(2), 1–24. https://doi.org/10.1371/ journal.pone.0229448
- Wu, C. Da, Cheng, C. C., y Chuang, Y. C. (2012). Spatial variability of evapotranspiration of old growth cypress forest using remote sensing - a case study of Chilan mountain cypress forest in Taiwan. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(6), 1060–1071. https:// doi.org/10.1139/X2012-066
- Yang, Y., Zhou, X., Yang, Y., Bi, S., Yang, X., y Liu, D. L. (2018). Evaluating water-saving efficiency of plastic mulching in Northwest China using remote sensing and SEBAL. *Agricultural Water Management*, 209, 240–248. https://doi.org/10.1016/j. agwat.2018.07.011