

## Saldo de radiação na restinga da Marambaia para dias de céu claro a partir de dados MODIS/Terra

Cristian Felipe Zuluaga Aristizábal<sup>1</sup>  
José Marinaldo Gleriani<sup>2</sup>  
Flávio Barbosa Justino<sup>3</sup>

Universidade Federal de Viçosa - UFV  
Caixa Postal 36 570-900 - Viçosa - MG, Brasil

<sup>1</sup> cristian.aristizabal@ufv.br

<sup>2</sup> gleriani@ufv.br

<sup>3</sup> fjustino@ufv.br

**Abstract.** The net radiation ( $R_n$ ) is indispensable for assessment of evapotranspiration and is responsible for heating the soil and the lower portions of the atmosphere. Many studies have been developed to estimate the net radiation using data from the surface and the atmosphere provided by the MODIS sensor aboard the Terra satellite. However, these data are sufficient to estimate the net radiation only at the instant of satellite overpass, while the larger interest of the net radiation is per daily values. This study aimed to study the net radiation in the restinga of Marambaia -RJ obtained remote sensing. The results were validated with data collected in an automatic meteorological station and presented good agreement. The results of remote sensing showed good performance for a clear day,  $r_2 = 0.93$ ,  $RMSE = 85.81 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $MAE = 74.50 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $d = 0.96$ . In general, this methodology were consider as interesting alternative in an effort to calculate the net radiation for areas without any instrumentation.

### 1. Introdução

Restinga é o termo usual para designar o ecossistema - pertencente ao bioma Mata Atlântica - que ocupa cerca de 79% das planícies do litoral do Brasil, formado por sedimentos de origem marinha datados do Quaternário (Lacerda *et al*, 1993; Silva *et al*, 2011). Este ecossistema tem diversas e importantes funções como: estabilização do substrato, formação de microclima, formação de solos distintos da areia, redução da erosão eólica, áreas de repouso de aves migratórias, recarga do lençol freático, redução de erosão, influência no transporte e deposição de sedimentos, e redução da intrusão salina (Nunes-Freitas *et al*, 2006; Rocha *et al*, 2007; Scarano, 2002). Atualmente, todos os remanescentes juntos de restinga não excedem dez por cento da sua área original, constituindo um ecossistema criticamente em perigo (Carvalho *et al*, 2015).

Para que possam ser tomadas medidas mitigatórias, é necessário que sejam desenvolvidos estudos sobre o microclima dos biomas, que associam o desmatamento ou queimadas com possíveis impactos no clima, causados pelas modificações no saldo de radiação, tornando-o como o principal elemento meteorológico e um dos fatores determinantes do tempo e do clima. Adicionalmente, muitos processos biológicos e físicos são controlados pela quantidade de energia solar recebida, refletida e emitida pela superfície terrestre e a atmosfera, a qual é determinada por meio do saldo de radiação ( $R_n$ ), componente fundamental do balanço de energia (Kjaersgaard *et al*, 2009; Teke *et al*, 2015; Wang e Liang, 2009).

Observações dos componentes do saldo de radiação vêm sendo realizadas há algumas décadas através de saldo radiômetros, no entanto, esta instrumentação, além de ter um alto custo e requer técnicas especiais de operação e calibração, proporciona medidas pontuais que são representativas apenas para áreas de pequena dimensão, que não podem ser utilizadas em escalas regionais (Bisht *et al*, 2005; Filho *et al*, 2006; Tang e Li, 2008).

Entre os avanços do sensoriamento remoto, encontra-se o sensor multiespectral MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), o principal sensor de mapeamento global

a bordo do satélite Terra, lançado em dezembro de 1999. Este, tem sido considerado como uma ferramenta eficaz para a observação da superfície da Terra e do estado da atmosfera, com alta resolução espaço-temporal (Amatya *et al*, 2015), com aquisição de dados em 36 bandas espectrais distintas que cobrem o espectro de 0,4  $\mu\text{m}$  a 14,4  $\mu\text{m}$ , e com resoluções espaciais de 250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas) e 1 km (29 bandas) (Santos *et al*, 2015). Vários algoritmos para estimar todos ou alguns dos componentes do saldo de radiação a partir de dados de satélites, como o Terra, tem sido desenvolvidos. Entre estes, destacam-se os algoritmos SEBAL (Bastiaanssen *et al*, 1998) e METRIC (ALLEN *et al*, 2007), que empregam dados de satélite, junto com dados auxiliares de estações de superfície. Por outro lado, Bisht *et al* (2005) propuseram um modelo sinusoidal para estimar o saldo de radiação, tanto seu valor médio diário quanto o ciclo diurno. Este modelo sinusoidal tem a vantagem de utilizar apenas observações do sensor (MODIS/Terra) para reconstruir a variação diurna do saldo de radiação nos dias de céu claro, e foi validado usando dados de campo de South Great Plains (37 ° N, 97 ° W), nos Estados Unidos. De acordo ao anterior, neste trabalho foi usado o algoritmo proposto por Bisht *et al* (2005) para estimar o saldo de radiação, instantâneo e seu ciclo diário, na restinga da Marambaia.

## 2. Metodologia

A restinga da Marambaia, localiza-se na Barra de Guaratiba, município do Rio de Janeiro (RJ), e é administrada pelo Centro de Avaliação do Exército Brasileiro (CAEx), conforme Figura 1.

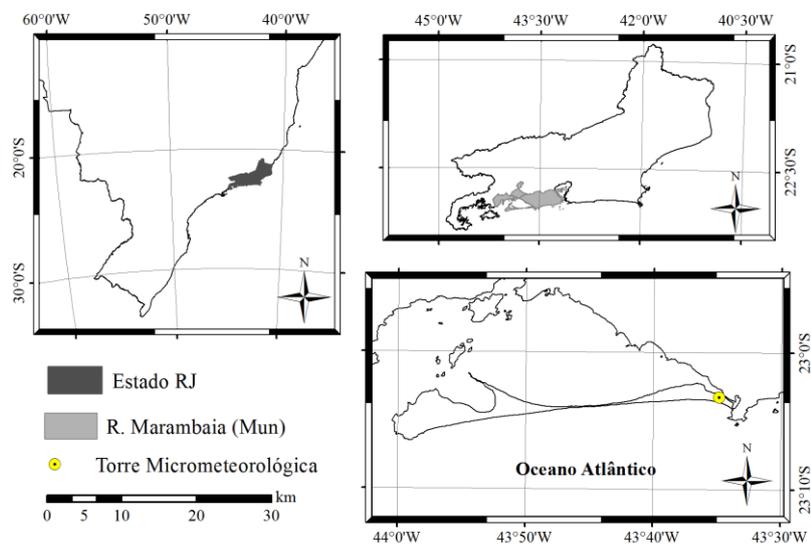


Figura 1. Localização da restinga de Marambaia e da torre micrometeorológica para medição do saldo de radiação.

A variação temporal dos componentes do saldo de radiação ( $R_n$ ) foi estudada a partir da medições feitas com um saldo radiômetro CNR4 (Kipp&Zonen), instalado em uma torre micrometeorológica (23°03'02" S, 43°34'49" W) – Figura 1- que mediu os componentes do  $R_n$ : radiação de onda curta incidente ( $ROC_{inc}$ ) e refletida ( $ROC_{ref}$ ), radiação de onda longa emitida pela atmosfera ( $ROL_{atm}$ ) e emitida pela superfície ( $ROL_{sup}$ ).

## 2.1. Produtos MODIS/Terra

Os produtos MODIS/Terra utilizados (Tabela 1) foram obtidos da NASA através do site *LAADS Web* (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>), no formato HDF. Utilizando-se o aplicativo Modis Reprojections Tools (MRT), foram convertidos para o formato GeoTIFF, na projeção UTM/WGS-84, com reamostragem do vizinho mais próximo, para posteriormente ser processados no programa SPRING 5.3. A restinga da Marambaia encontra-se localizada dentro dos tiles h13v11 e h14v11.

Tabela 1. Descrição dos produtos MODIS/Terra utilizados.

Produto	Descrição	Resolução (km)	Usado no cálculo de
MOD11A1	Temperatura da superfície (K)	1	ROlsup
	Emissividade da superfície	1	ROlsup
	Hora de passagem do satélite	1	Modelo senoidal
MOD09GA	Ângulo zenital (Grau)	0,5	ROCinc
	Refletância	1	Albedo
MOD07_L2	Temperatura do ar (K)	5	ROlatm
	Temperatura de ponto orvalho (K)	5	ROCinc

As imagens MODIS/Terra selecionadas são as referentes aos dias sequenciais do ano (DAS) 100, 101, 102, 118, 129, 158, 179, 212, 213, 214, 215, 216, 222, 224 e 288 do ano de 2016. Todas as imagens foram reprojatadas para 1 km.

## 2.2. Método de Bisht *et al* (2005) para determinação do Rn

A radiação de onda curta incidente foi calculada conforme a equação 1:

$$ROC_{inc} = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{1,08 \cos \theta + e_0 (2,7 * \cos \theta) * 10^{-3} + 0,2} \quad (1)$$

em que  $S_0$  é a constante solar ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ),  $\theta$  é o ângulo zenital solar (obtido do produto MOD09GA),  $e_0$  é a pressão parcial de vapor (hPa), obtida pela equação 2:

$$e_0 = 6,11 \exp \left[ \frac{Lv}{Rv} \left( \frac{1}{273,15} - \frac{1}{Td} \right) \right] \quad (2)$$

onde  $Lv$  é o calor latente de vaporização de água ( $2,5 * 10^6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $Rv$  é a constante de vapor d'água ( $61,50 \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $Td$  é a temperatura de ponto orvalho (Obtida do produto MOD07\_L2).

O albedo da superfície vegetada foi estimado através de:

$$\alpha = 0,215\rho_1 + 0,215\rho_2 + 0,242\rho_3 + 0,129\rho_4 + 0,101\rho_5 + 0,062\rho_6 + 0,036\rho_7 \quad (3)$$

em que  $\rho$  de 1 até 7 representam as refletâncias monocromáticas relativas a cada uma das sete bandas espectrais do MODIS/Terra, distribuídos por meio do produto MOD09GA.

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera foi calculada usando a equação 4:

$$ROL_{atm} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (4)$$

onde  $T_a$  é a temperatura do ar (obtida do produto MOD07\_L2),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica, obtida com a equação de Prata:

$$\varepsilon_a = \{1 - (1 + \vartheta) \exp[-(1,2 + 3\vartheta)^{0,5}]\} \quad (5)$$

em que:

$$\vartheta = 46,5 \frac{e_0}{T_a} \quad (6)$$

Para estimar a radiação de onda longa emitida pela superfície, foi usada a equação 7:

$$ROL_{sup} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (7)$$

Onde  $\varepsilon_s$  é a emissividade da superfície (obtida do produto MOD11A1),  $T_s$  é a temperatura da superfície (obtida do produto MOD11A1).

O saldo de radiação no instante da passagem do satélite foi estimado como:

$$Rn = (1 - \alpha) ROC_{inc} + ROL_{atm} - ROL_{sup} \quad (8)$$

O ciclo diurno foi calculado a partir do modelo senoidal da equação 9:

$$Rn(t) = Rn_{max} \sin \left[ \left( \frac{t - t_{nas}}{t_{pôr} - t_{nas}} \right) \pi \right] \quad (9)$$

em que  $t$  é a hora em que deseja-se saber o valor de  $Rn$ ,  $t_{nas}$  é a hora de nascer do sol,  $t_{pôr}$  é a hora do pôr do sol,  $Rn_{max}$  é o saldo de radiação máximo no dia estudado:

$$Rn_{max} = \frac{INR}{\sin \left[ \left( \frac{t_{pass} - t_{nas}}{t_{pôr} - t_{nas}} \right) \pi \right]} \quad (10)$$

Onde  $t_{pass}$  é a hora de passagem do sensor MODIS/Terra sobre a área de estudo.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Saldo de radiação instantâneo

Na Figura 2, para o saldo de radiação obtido a partir dos produtos MODIS/Terra no instante de passagem do satélite, o coeficiente de determinação foi de 0,79, RMSE e MAE foram de  $82,52 \text{ W m}^{-2}$  e  $66,52 \text{ W m}^{-2}$  respectivamente, e o índice de concordância foi de 0,85.

Bisht et al (2005), autores da metodologia empregada neste trabalho, reportaram  $r^2 = 0,89$  e  $RMSE = 74 \text{ W m}^{-2}$ , para Southern Great Plains, nos Estados Unidos. Yu et al (2014), utilizando a mesma metodologia para o cálculo de  $R_n$ , obtiveram  $RMSE = 34,32 \text{ W m}^{-2}$ . No Brasil, Santos et al (2015), determinaram o  $R_n$  para dois sítios pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu. Eles obtiveram  $r^2 = 0,96$  e  $RMSE = 48,98 \text{ W m}^{-2}$ , para o sítio localizado no Cerrado, e  $r^2 = 0,89$  e  $RMSE = 58,52 \text{ W m}^{-2}$ , para a torre situado na Usina de Santa Rita, em Luiz Antônio, SP. Isto evidencia que ao se analisar o resultado de  $R_n$ , que equivale a uma visão global da metodologia, esta conseguiu estimar valores próximos aos dados reais.

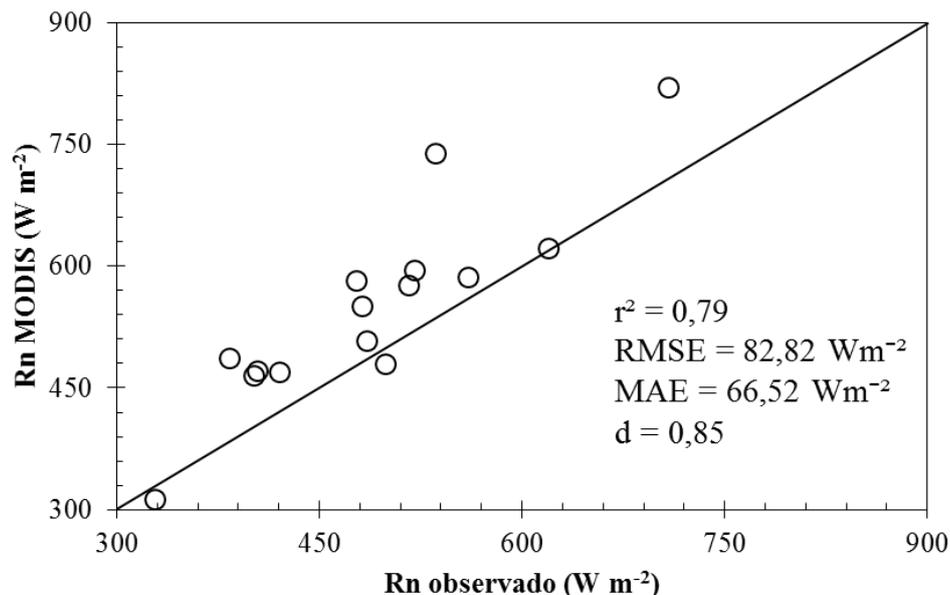


Figura 2. Valores de saldo de radiação observados e estimados pelo sensor MODIS/Terra na restinga da Marambaia.

De forma geral, os resultados gerados pelo MODIS/Terra superestimaram o saldo de radiação em superfície, mas, contudo, a metodologia utilizada neste estudo apresentou resultados satisfatórios de saldo de radiação instantâneo para a restinga da Marambaia durante os dias de estudo, mostrando ser capaz de estimar com boa precisão para grandes áreas heterogêneas sem necessidade de dados coletados em superfície para entrada no modelo.

### 3.2. Ciclo diurno do saldo de radiação (Modelo Senoidal)

Na Figura 3, apresentam-se o ciclo diurno do balanço de radiação ( $R_n$ ) observado, e estimados pelo MODIS através do modelo senoidal. Nos casos a, b e c da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os melhores ajustes, em relação aos dados observados, correspondem ao modelo senoidal, evidenciando condições de céu claro para todo o dia. Já para o caso do dia 15 de outubro (d), o balanço de radiação observado mostrou uma pequena flutuação nas primeiras horas da manhã, provavelmente devido à presença de nebulosidade.

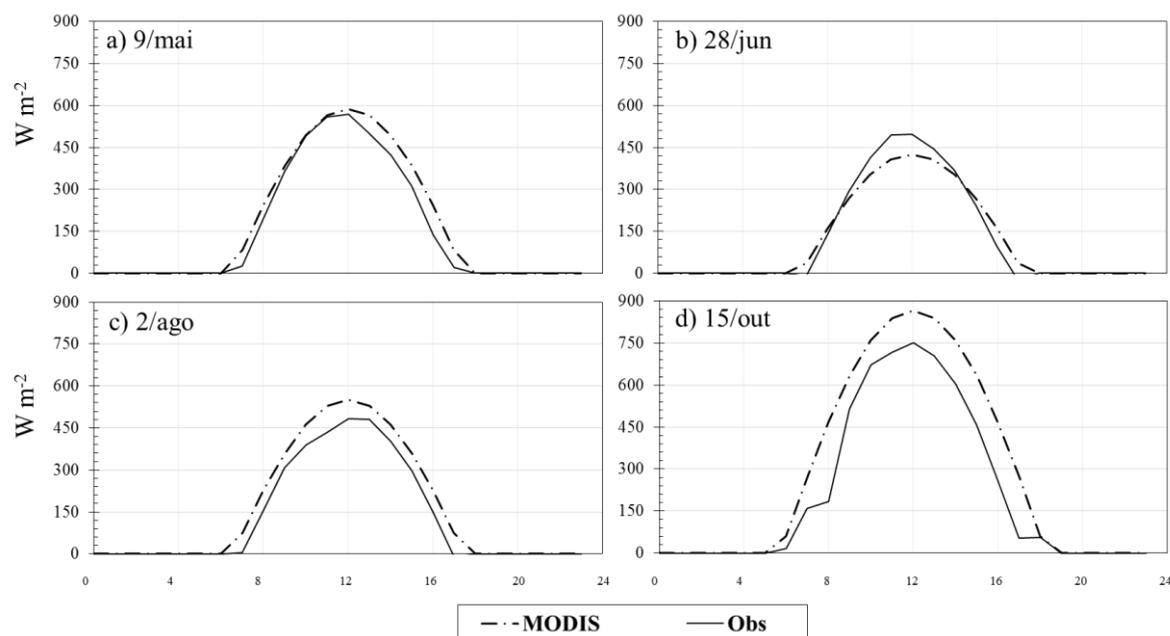


Figura 3. Ciclo diurno do saldo de radiação obtido com o modelo senoidal para os dias a) 9 de maio, b) 28 de junho, c) 2 de agosto e d) 15 de outubro.

Na Tabela 2 apresenta-se a avaliação de desempenho estatístico do modelo senoidal para os 15 dias de céu claro selecionados. Poderia considerar-se que, de modo geral, o modelo senoidal foi capaz de capturar a variação diurna do  $R_n$  para os dias de céu claro. Isto também foi encontrado por Bisht et al (2005), que obtiveram  $r^2 = 0,99$ ,  $RMSE = 28 \text{ W m}^{-2}$ ; e por Santos et al (2015) que reportaram  $r^2 = 0,95$  tanto para o Cerrado, quanto para a Usina de Santa Rita, SP.

Tabela 2. Desempenho estatístico do modelo senoidal na simulação do ciclo diurno do saldo de radiação.

Método	$r^2$	RMSE ( $\text{W m}^{-2}$ )	MAE ( $\text{W m}^{-2}$ )	d
MODIS	0,93	85,81	74,50	0,96

#### 4. Conclusões

Entre as fontes do erro na metodologia do sensoriamento remoto poderiam se considerar: a) A heterogeneidade da superfície pode levar a erros maiores de 1K da temperatura de superfície, obtida do produto MOD11A1; b) O método assume que a condição de céu claro encontrada no instante da passagem do satélite, é constante durante todo o dia. Esta premissa leva a grandes erros, quando nos instantes anteriores ou posteriores à passagem do satélite, se apresenta nebulosidade; c) Provavelmente, a resolução espacial do sensor utilizado seja baixa para uma área tão pequena como a restinga da Marambaia. Contudo, este trabalho mostrou que a metodologia de Bisht pode ser considerada como alternativa interessante no esforço de calcular o saldo de radiação para áreas sem nenhuma instrumentação.

## Referências Bibliográficas

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC). **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395–406, 2007.

AMATYA, P. M. et al. Estimation of net radiation flux distribution on the southern slopes of the central Himalayas using MODIS data. **Atmospheric Research**, v. 154, p. 146–154, 2015.  
BASTIAANSEN W.G.M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, 1998.

BISHT, G. et al. Estimation of the net radiation using MODIS ( Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 52–67, 2005.

CARVALHO, A. L. G. DE; SOMNER, G. V.; ALLEN, J. Is the phenology of all restinga species the same? A taxonomically-focused study of Sapindaceae in a highly threatened coastal environment. **Flora**, v. 215, p. 92–101, 2015.

LACERDA, L. D.; ARAUJO, D. S. D.; MACIEL, N. C. Dry coastal ecosystems of the tropical Brazilian coast. In: **Dry coastal ecosystems Africa, America, Asia and Oceania**. ELSEVIER ed. [s.l: s.n.]. p. 477–493.

NUNES-FREITAS, A. F. et al. Bromeliaceae da restinga da Reserva Biológica Estadual da Praia do Sul: composição, abundância e similaridade da comunidade. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 3, p. 709–717, 2006.

ROCHA, C. F. D. et al. The remnants of restinga habitats in the Brazilian Atlantic Forest of Rio de Janeiro state, Brazil: habitat loss and risk of disappearance. **Brazilian journal of biology**, v. 67, n. 2, p. 263–273, 2007.

SANTOS, F. A. C. et al. Desempenho de metodologias para estimativas de saldo de radiação a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, p. 295–306, 2015.

SCARANO, F. R. Structure, function and floristic relationships of plant communities in stressful habitats marginal to the Brazilian Atlantic rainforest. **Annals of Botany**, v. 90, n. 4, p. 517–524, 2002.

SILVA, L. F. M.; MARTINS, S. V.; PEREIRA, O. J. Heterogeneidade Florística das Fitocenoses de Restingas nos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, Brasil. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 245–254, 2011.

YU, L. et al. Estimating land surface radiation balance using MODIS in northeastern China. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 83523, 2014.