Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

EVAPOTRANSPIRAÇÃO INSTANTÂNEA E SUA RELAÇÃO COM TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE, ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E TIPOS DE COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS VACACAÍ-VACACAÍ MIRIM – PAMPA BRASILEIRO

Instantaneous Evapotranspiration and its relation to surface temperature, vegetation index, and types of land cover in the Hydrographic Basin of the Vacacaí-Vacacaí Mirim Rivers – Brazilian Pampas

Evapotranspiración instantánea y su relación con la temperatura superficial, el índice de vegetación y los tipos de cobertura del suelo en la cuenca del río Vacacaí-Vacacaí Mirim – Pampa Brasileño

Alessandra Aparecida da Luz Moraes
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
alehmooraes@gmail.com

Tatiana Mora Kuplich
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
tatiana.kuplich@inpe.br

Patricia Michele Pereira Trindade
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
patriciatrindade.sr@gmail.com

Daniela Wancura Barbieri Peixoto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
daniwbarbieri@gmail.com

Resumo: A evapotranspiração (ET) é uma das principais componentes do ciclo hidrológico. Diante disto, a presente pesquisa tem objetivo analisar a Evapotranspiração Instantânea (ETi) estimada a partir de dados de SR e sua correlação com a TS e NDVI na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí-Vacacaí Mirim localizada no Pampa Brasileiro, considerando possíveis mudanças de cobertura do solo verificadas a partir de classificação digital de imagens. A metodologia utilizada envolveu o uso do algoritmo Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) para estimativa de ETi, com imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS,

para inverno (28/08/2013 e 30/07/2020) e verão (19/01/2014 e 08/03/2020) e dados meteorológicos (umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica), disponibilizados do Instituto Nacional de Meteorologia. A partir das imagens de satélite também foram calculados o índice de vegetação NDVI e temperatura de superfície, e mapas de cobertura do solo. Os resultados obtidos permitiram uma análise espacial e temporal das variáveis supracitadas e a influência dessas em diferentes tipos de cobertura no solo. Foi verificada a correlação negativa de grau forte entre as variáveis TS e ETi, correlação positiva de grau regular para NDVI e ETi para quatro imagens analisadas. Além disso, constataram-se variações significativas em um intervalo de mudança de cobertura do solo entre áreas de pousio e cultivo agrícola. As técnicas de sensoriamento remoto viabilizaram a identificação das alterações e o comportamento das variáveis em diferentes coberturas do solo, apontando para o impacto das alterações dessas variáveis em ambientes antropizados.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Bacia Hidrográfica. Sensoriamento Remoto.

Abstract: Evapotranspiration (ET) is one of the main components of the hydrologic cycle. Thus, the present research intends to analyze the Instantaneous Evapotranspiration (iET) estimated from SR data and its correlation with ST and NDVI in the Hydrographic Basin of the Vacacaí-Vacacaí Mirim rivers, located on the Brazilian Pampas, considering possible changes in soil cover verified through the classification of digital images. The methodology employed included the use of Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) for the estimation of iET, with Landsat 8 OLI/TIRS satellite images for winter (08/28/2013 and 07/30/2020) and summer (01/19/2014 and 03/08/2020) and meteorological data (relative humidity, wind speed, and atmospheric pressure), available at the National Institute of Meteorology. From the satellite images, we also calculated the NDVI and surface temperature, and maps of soil cover. The results obtained allowed for spatial and temporal analysis of the aforementioned variables and their influence over different types of soil cover. We were able to verify a negative correlation of high degree between the ST and iET variables, a positive correlation of moderate degree for NDVI and iTE for four images analyzed. In addition, we observed meaningful variations in an interval of soil cover change between areas of fallow and agricultural cultivation. The techniques of remote sensing enabled the identification of the alterations and the behavior of the variables in different soil covers, pointing to the impact of the alterations of these variables in anthropized environments.

Keywords: Evapotranspiration. Hydrographic Basin. Remote Sensing.

Resumen: La evapotranspiración (ET) es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo analizar la Evapotranspiración Instantánea (ETi) estimada a partir de datos de SR y su correlación con TS y NDVI en la Cuenca Hidrográfica de los Ríos Vacacaí-Vacacaí Mirim ubicada en la Pampa Brasileña, considerando posibles cambios en la cobertura del suelo verificados a partir de la clasificación de imágenes digitales. La metodología empleada implicó el uso del algoritmo Surface Energy Balance for Land (SEBAL) para estimar ETi, con imágenes satelitales Landsat 8 OLI / TIRS, para invierno (28/08/2013 y 30/07/2020) y verano (01 / 19/2014 y 03/08/2020) y datos meteorológicos (humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica), a disposición del Instituto Nacional de Meteorología. A partir de las imágenes de satélite, también se calcularon el índice de vegetación NDVI, la temperatura de la superficie, y los mapas de cobertura del suelo. Los resultados obtenidos permitieron un análisis espacial y temporal de las variables mencionadas y su influencia en diferentes tipos de cobertura del suelo. Se verificó una correlación negativa de grado fuerte entre las variables TS y ETi, correlación positiva de grado regular para NDVI y ETi para cuatro imágenes analizadas. Además, se encontraron variaciones significativas en un intervalo de cambio en la cobertura del suelo entre las áreas de barbecho y los cultivos agrícolas. Las técnicas de teledetección permitieron identificar cambios y el comportamiento de variables en diferentes coberturas terrestres, apuntando al impacto de cambios en estas variables en ambientes antropizados.

Palabras clave: Evapotranspiración. Cuenca hidrográfica. Teledetección

Submetido em: 29/09/2021
Aceito para publicação em: 07/03/2022
Publicado em: 13/04/2022

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é o segundo componente de maior relevância no ciclo hidrológico, depois da precipitação (BRUTSAERT, 2005). Conforme Mohan e Arumugan (1996), a ET pode ser afetada por variáveis climáticas, como a precipitação, velocidade do vento, razão de insolação, umidade relativa e temperatura. Sua medição pode ser feita por equipamentos específicos, de alto custo e os resultados estimados são valores pontuais. A adoção destes dados para grandes regiões pode resultar em uma estimativa incorreta de evapotranspiração, devido à heterogeneidade da cobertura do solo (FOLHES, 2007).

Os fatores limitantes para a estimativa de evapotranspiração nas bacias hidrográficas são os diferentes tipos de cobertura, diante disto, estudos vêm sendo desenvolvidos com técnicas de sensoriamento remoto para estimativa em grandes áreas (BASTIAANSSEN, 2000; ALLEN et al., 2002). A estimativa de ET é fundamental para estudos de ecossistemas e produtividade agrícola, gerando informações importantes para o planejamento e monitoramento de bacias hidrográficas (ATAÍDE, 2012). O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é caracterizado por sua geomorfologia, forma, geologia, tipos de cobertura vegetal existentes, etc. (LIMA, 1986). Ações antrópicas interferem nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005), influenciando em processos como a infiltração, escoamento superficial, dentre outros.

Neste contexto, o sensoriamento remoto (SR) possibilita a estimativa de ET em grandes áreas com curtos períodos de obtenção de dados, possibilitando estudos sazonais. Lima et al. (2014) destacam que “O uso dos dados de SR vem se tornando ferramenta potencial para a determinação de fluxos de superfície e da evapotranspiração”.

Nos últimos anos, diversos modelos semi-empíricos foram desenvolvidos para realizar estimativas de evapotranspiração, buscando explorar maiores áreas e a aplicação de técnicas que possibilitam a interpolação/extrapolação das informações pontuais obtidas das estações meteorológicas (MENDES; GIACOMONI, 2008). De acordo com Gomes (2009), a principal vantagem destes modelos semi-empíricos é sua aplicabilidade em áreas extensas e heterogêneas.

Dentre os modelos para estimativa de ET destaca-se o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e complementado por

Allen et al. (2002). Esse algoritmo foi desenvolvido para estimar a ET utilizando imagens orbitais e informações meteorológicas da superfície.

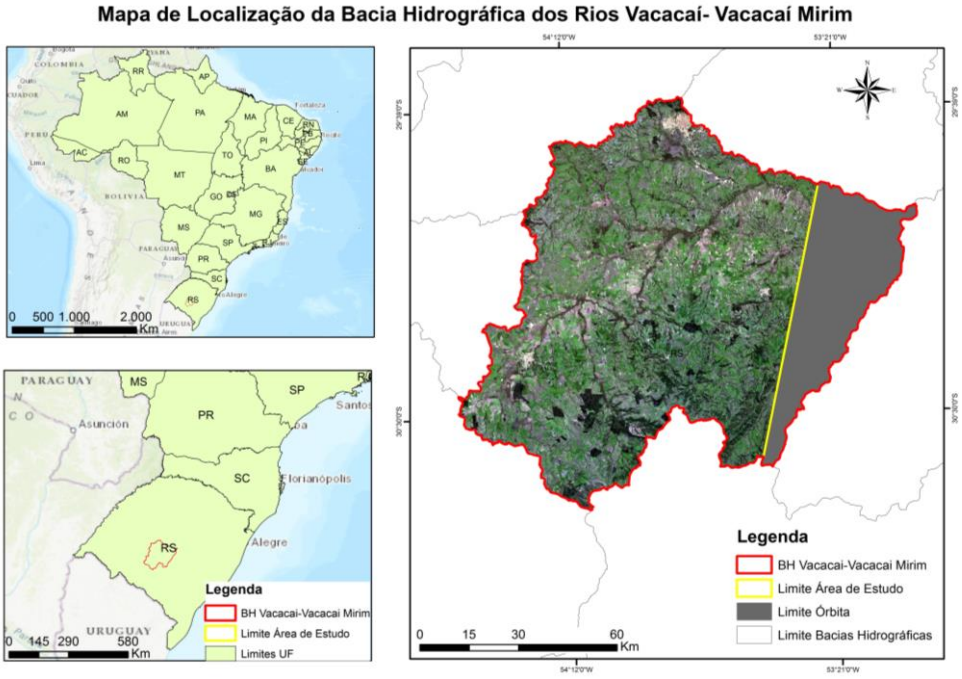
Segundo Costa (1997), dados e técnicas de SR podem ser utilizados na estimativa de condições hidrológicas da vegetação e dos solos em bacias hidrográficas. Os índices de vegetação, como o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), têm sido amplamente utilizados em várias aplicações, incluindo o mapeamento de áreas com diferentes índices de cobertura vegetal, na classificação do uso da terra (FECHINE; GALVÍNCIO, 2008), monitoramento ambiental e em estudos de ET (ARRAES et al., 2012), que incluem o balanço de energia e a Temperatura da Superfície (TS).

Estudos demonstram que áreas de campo vêm sendo utilizadas de forma inadequada, ocasionando perda cobertura vegetal e erosão hídrica, diminuindo a evapotranspiração, disponibilidade e armazenamento de água no solo (LANZA et al., 2014). No cenário de conservação de coberturas campestres, pode-se citar pesquisas desenvolvidas no projeto Nexus (que avalia os cenários de conversão agrícola dos campos nativos e seus impactos no bioma Pampa, para edital do CNPq). A presente pesquisa buscou contribuir com o projeto supracitado a partir da análise e discussão sobre as características da evapotranspiração, dentre outras variáveis, em uma bacia hidrográfica do bioma Pampa. Desta forma, o objetivo foi analisar a Evapotranspiração Instantânea (ETi) estimada a partir de dados de SR e sua correlação com a TS e NDVI na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí-Vacacaí Mirim localizada no Pampa Brasileiro, considerando possíveis mudanças de cobertura do solo verificadas a partir de classificação digital de imagens.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí-Vacacaí Mirim, localizada no Estado do Rio Grande do Sul – Brasil (Figura 1). A área de estudo é parte do Bioma Pampa e abrange os municípios de Caçapava do Sul, Júlio de Castilhos, Santa Maria e São Gabriel, totalizando uma área de aproximadamente 11.077,34 km².

Figura 1 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí-Vacacaí Mirim



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.1. Procedimentos Metodológicos

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram: camada vetorial das Bacias Hidrográficas Ottocodificadas da Agência Nacional das Águas (ANA), nível 4; Imagens orbitais do satélite Landsat 8 sensores OLI/TIRS, para as seguintes datas 28/08/2013, 30/07/2020, correspondentes aos meses de inverno e 19/01/2014, 08/03/2020 correspondentes aos meses de verão; Modelo Digital do Terreno (SRTM), resolução espacial de 30m; e dados meteorológicos (umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação localizada no Município de Santa Maria – RS (código 83936).

Foram estabelecidas três etapas gerais: processamento de imagens com o cálculo de ETi, TS e NDVI no *software* QGIS 3.10.13; classificação de imagens no *software* Envi 5.3; e análises de estatística descritiva e correlação dos dados obtidos.

2.2. Etapa 1 – Processamento de imagens

As imagens orbitais foram adquiridas de forma gratuita no banco de dados disponível da *United States Geological Survey* (USGS). A bacia hidrográfica é recoberta por duas órbitas

ponto (223/81 e 221/81), foram utilizadas imagens da órbita ponto 223/81 que recobre maior área da bacia (aproximadamente 84%, correspondente a 9.315,49km²), pois as datas das imagens da órbita ponto 222/81 eram diferentes. Inicialmente foram realizados cálculos de NDVI (Fórmula 1) e TS (Fórmula 2) no *software* QGIS 3.10.13 e posteriormente a aplicação da metodologia do algoritmo SEBAL, proposta por Bastiaanssen (1995), para a estimativa de ETi. A estimativa de ETi, contou com cálculos complexos em que foram utilizados dados orbitais e meteorológicos (Figura 2).

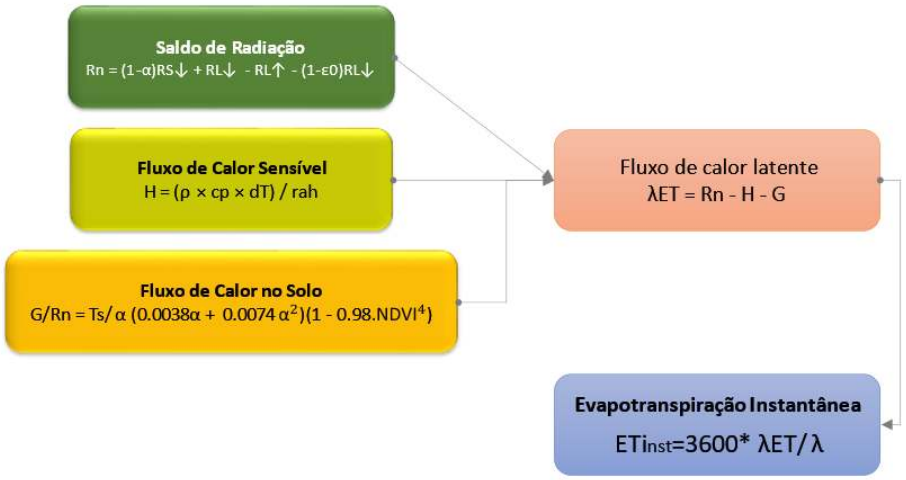
$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (1)$$

onde: pIV, corresponde as reflectâncias das bandas 5 e pV corresponde as reflectâncias das bandas 4 do sensor OLI.

$$T_S = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda 10}} + 1\right)} \quad (2)$$

onde: K1 e K2 são constantes de calibração das bandas termais do sensor e $L_{\lambda 10}$ é a radiância espectral no topo da atmosfera para a banda 10 ($Wm^{-2}\ sr^{-1}\ m^{-1}$).

Figura 2 – Etapas para estimativa de Evapotranspiração Instantânea



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

onde: RL↑ corresponde a radiação de onda longa emitida pela superfície (Wm^{-2}), RL↓ é a radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na superfície (Wm^{-2}), RS↓ corresponde a radiação incidente de onda curta (Wm^{-2}), εo é a emissividade da superfície de

banda larga; α é ao albedo da superfície; Ts corresponde a temperatura da superfície (K); α é ao albedo da superfície e NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada; ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}), cp é o calor específico do ar (1004 Jkg K^{-1}), dT é a diferença de temperatura (T1-T2) e rah é a resistência aerodinâmica (sm^{-1}).

Inicialmente foi calculado o saldo de radiação (Rn) na superfície, correspondente à energia disponível na superfície, sendo calculado a partir da subtração dos fluxos radiantes de entrada e saída (ALLEN et al., 2002). Posteriormente, iniciou-se o cálculo do fluxo de calor no solo (G), é a taxa de armazenamento de calor no solo e na vegetação devido à condução (ALLEN et al., 2002). O cálculo do fluxo de calor sensível (H), conforme Allen et al. (2002) "corresponde à taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução, devido a uma diferença de temperatura".

A partir das variáveis do saldo de radiação, fluxo de calor no solo e fluxo de calor sensível, iniciou-se o cálculo do fluxo de calor latente (λET), obtido como resíduo na equação do balanço de energia. Segundo Allen et al. (2002), o λET "... é a taxa de perda de calor latente da superfície devido à evapotranspiração". Posteriormente, a ETi (também conhecida como evapotranspiração horária), foi estimada como o produto entre o λET e calor latente de vaporização (λ), multiplicando-a por 3.600 segundos.

2.3. Etapa 2 – Classificação de imagens

A classificação de imagens foi realizada utilizando o algoritmo *Maximum Likelihood Classification* (conhecido como MAXVER), este algoritmo é um classificador pixel a pixel que calcula a probabilidade de um pixel pertencer a uma classe pré-estabelecida (RICHARDS, 1993; SCHOTT, 1997). A partir da análise de diferentes composições coloridas com as bandas de reflectância de superfície foi possível identificar quatro classes de cobertura do solo (vegetação arbórea, campo, área de cultivo 1 – com cobertura vegetal, e área de cultivo 2 – solo exposto, os tipos de uso nas áreas de cultivo não foram identificados devido a resolução espacial das imagens), sendo coletadas 50 amostras de treinamento para cada classe identificada. Uma máscara de hidrografia do Pampa, disponível na plataforma TerraBrasilis, foi utilizada para as áreas cobertas por represas e rios. As áreas que não se enquadram nas represas e rios e nas classes identificadas foram nomeadas como "não classificadas".

Para a validação das classificações foram distribuídos 251 pontos de referência de forma regular sobre a área de estudo, totalizando 1004 interpretações. Assim, cada ponto foi analisado considerando as imagens Landsat 8 e imagens de alta resolução da plataforma *Google Earth* (com datas próximas às imagens utilizadas para as classificações). A partir do cruzamento dos pontos de referência com as imagens classificadas foi possível gerar matriz de erros para calcular a acurácia global das classificações.

2.4. Etapa 3 – Análises estatísticas

As análises foram realizadas a partir dos mesmos 251 pontos utilizados na etapa anterior, onde foram extraídos os valores das variáveis (TS, ETi e NDVI) e classes de cobertura do solo. Desta forma, calculou-se as estatísticas descritivas para cada variável física (ETi, TS e NDVI), considerando diferentes estações do ano (verão e inverno) e as classes de cobertura para um intervalo de sete anos. Para verificar as relações entre as variáveis supracitadas foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson com teste de significância estatística ($\alpha = 0,05$). Na análise de mudanças de cobertura realizou-se o cruzamento entre os pontos para duas imagens de verão (2014 e 2020), por apresentarem maiores valores de correlação entre os dados, considerando classes de cobertura, ETi, TS e NDVI.

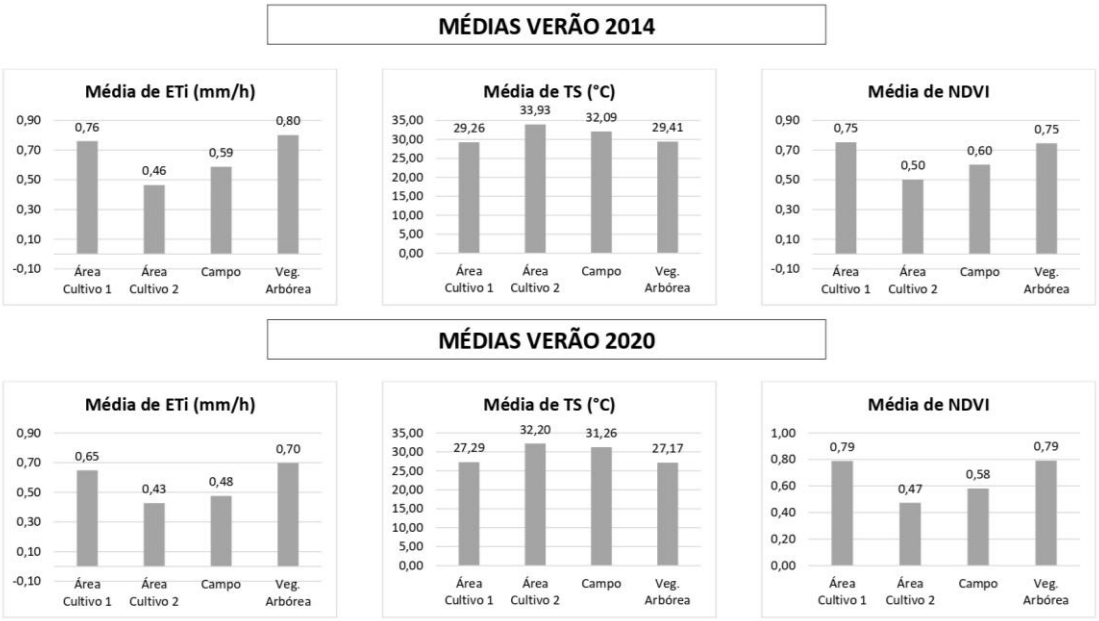
3. DESENVOLVIMENTO

A partir da análise visual e interpretção das imagens foi possível identificar quatro classes de cobertura do solo (área de cultivo 1, área de cultivo 2, campo e vegetação arbórea), sendo que a acurácia dos mapas gerados variou de 81% a 92%. Desta forma, a partir da análise conjunta dos mapas classificados e mapas das variáveis ETi, TS e NDVI, verificou-se os valores médios dessas variáveis para cada classe de cobertura do solo.

As imagens de verão (janeiro/2014 e março/2020) apresentaram maiores médias das variáveis físicas. As áreas de vegetação arbórea (floresta nativa e silvicultura) e áreas de cultivo 1 (com vegetação – o tipo de uso não foi definido devido a resolução espacial das imagens) apresentaram maiores médias de ETi e NDVI e menores médias de TS, enquanto áreas de cultivo 2 (solo exposto) e áreas de campo, foram verificadas maiores médias de TS e menores médias de ETi e NDVI (Figura 3). Resultados apontados por Fujaco e Leite (2013), as

áreas de mata ciliares, florestas implantadas e cultivos agrícolas apresentaram maiores valores de evapotranspiração, enquanto os menores foram localizados em áreas de pouca vegetação.

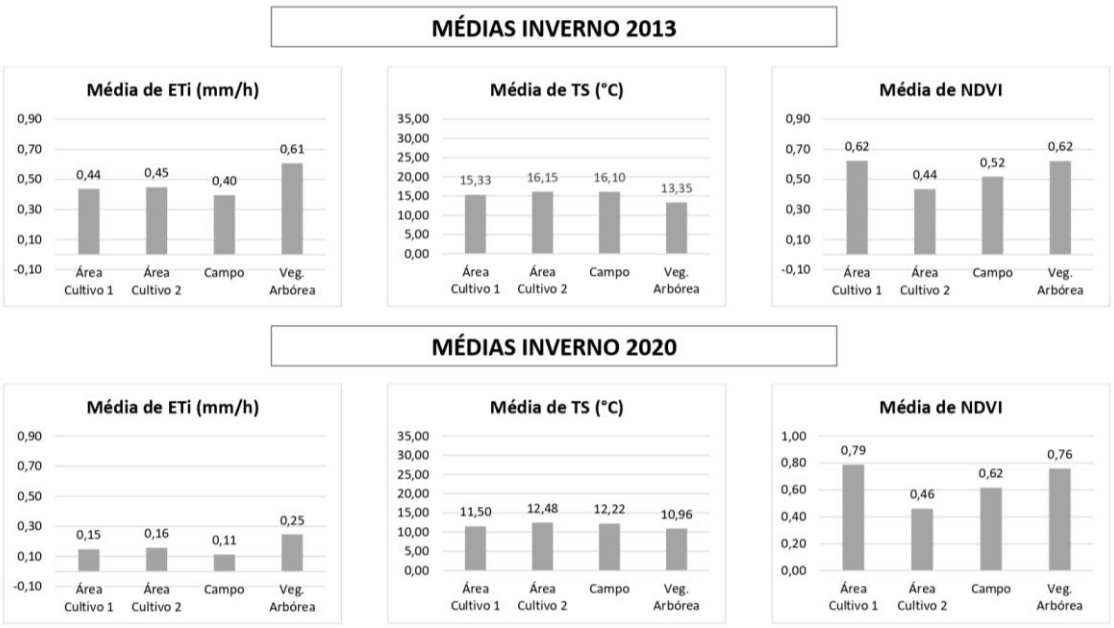
Figura 3 – Médias estimadas para datas de verão de 2014 e 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Nas imagens de inverno (agosto/2013 e julho/2020), verificou-se que as áreas com vegetação arbórea apresentaram maiores médias de ETi e menores médias de TS. As maiores médias de NDVI foram verificadas em áreas de cultivo 1, as áreas de cultivo 2 e áreas de campo apresentaram maiores valores de TS e os menores valores de ETi e NDVI, em decorrência da cobertura vegetal rasteira (Figura 4). O estudo realizado por Pereira et al. (2012) verificou que áreas de solo exposto e áreas de pousio apresentaram maiores valores de TS, enquanto áreas com temperaturas mais amenas correspondem a áreas cobertas por vegetação densa. A queda nos valores de ETi para a imagem de inverno/2020 pode ser justificada pelo aumento da umidade relativa (UR) do ar (valor de 90%) em relação à data da imagem de 2013 (valor de 84%). O estudo realizado por Ismael Filho et al. (2015) demonstrou que a UR tem grande efeito sobre a evapotranspiração, em que se assume relação inversa.

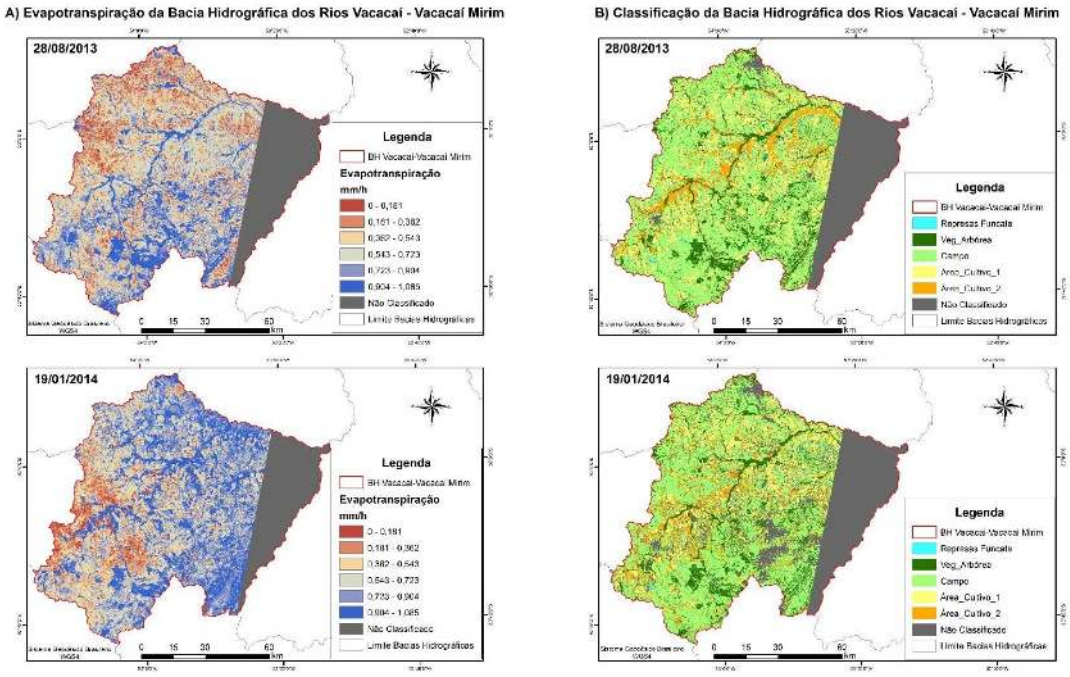
Figura 4 – Médias estimadas para datas de inverno de 2013 e 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Foram gerados mapas para as datas analisadas, onde verificou-se a distribuição espacial das variáveis ETi, NDVI e TS para diferentes tipos de cobertura do solo no perímetro da bacia hidrográfica. Para a imagem de inverno/2013 e verão/2014, houve variação de ETi de 0 a 0,78mm/h e 0 a 1,08mm/h, respectivamente, sendo os menores valores verificados em áreas de campo e áreas de cultivo 2, contendo cobertura do solo esparsa ou solo exposto e maiores valores para áreas de vegetação arbórea e cultivo agrícola (Figura 5). Estudos realizados por Pacheco et al. (2014) verificaram o mesmo padrão, onde menores valores de evapotranspiração diária (ETr), observados em áreas de solo exposto ou áreas urbanizadas entre 0 e 2 mm.dia^{-1} e maiores valores entre 2 a 5 mm.dia^{-1} em áreas de vegetação nativa.

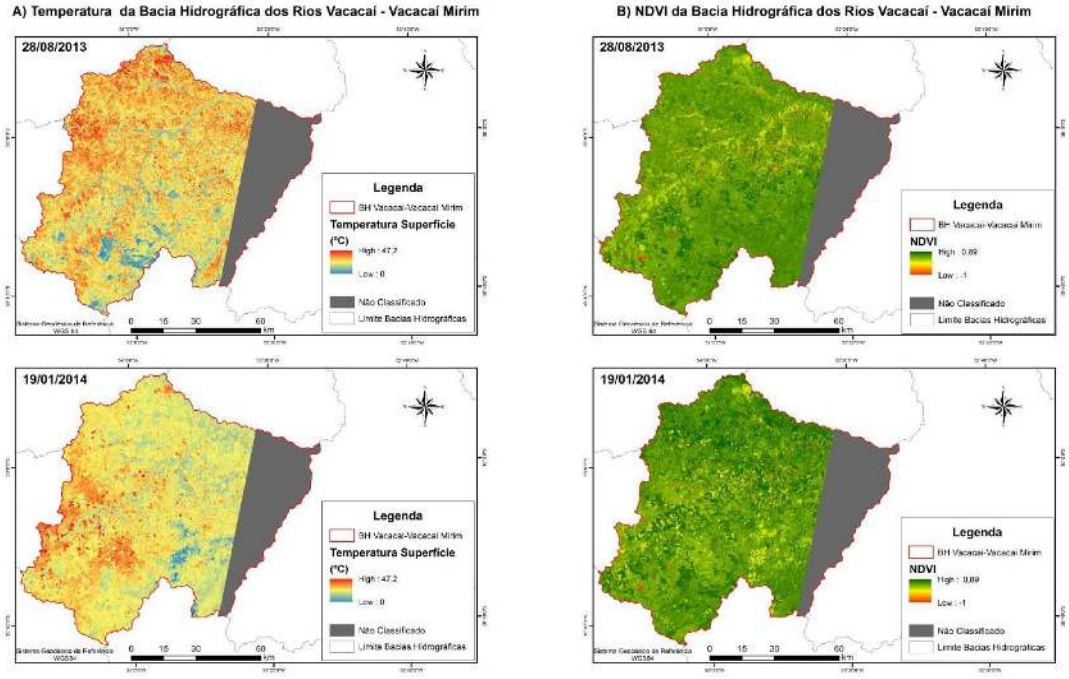
Figura 5 - A) Mapa de ETi de inverno/2013 e verão/2014; B) Mapa da cobertura do uso dosolo de inverno/2013 e verão/2014.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para imagem de inverno/2013 verificou-se que a TS variou de 9,96 a 22,05°C e de NDVI de -0,9 a 0,88, para imagens de verão/2014 identificou-se uma variação de 27,9 a 47,23°C para TS e NDVI valores entre -0,67 a 0,89 (Figura 6). O estudo realizado por Oliveira et. al (2019), em diferentes tipos de cobertura do solo do Município de Rio Verde - GO, apontou que valores de TS apresentaram maiores médias em áreas antropizadas e menores em áreas de vegetação, enquanto os maiores valores de NDVI foram verificados em áreas de vegetação e em áreas de cultivo agrícola.

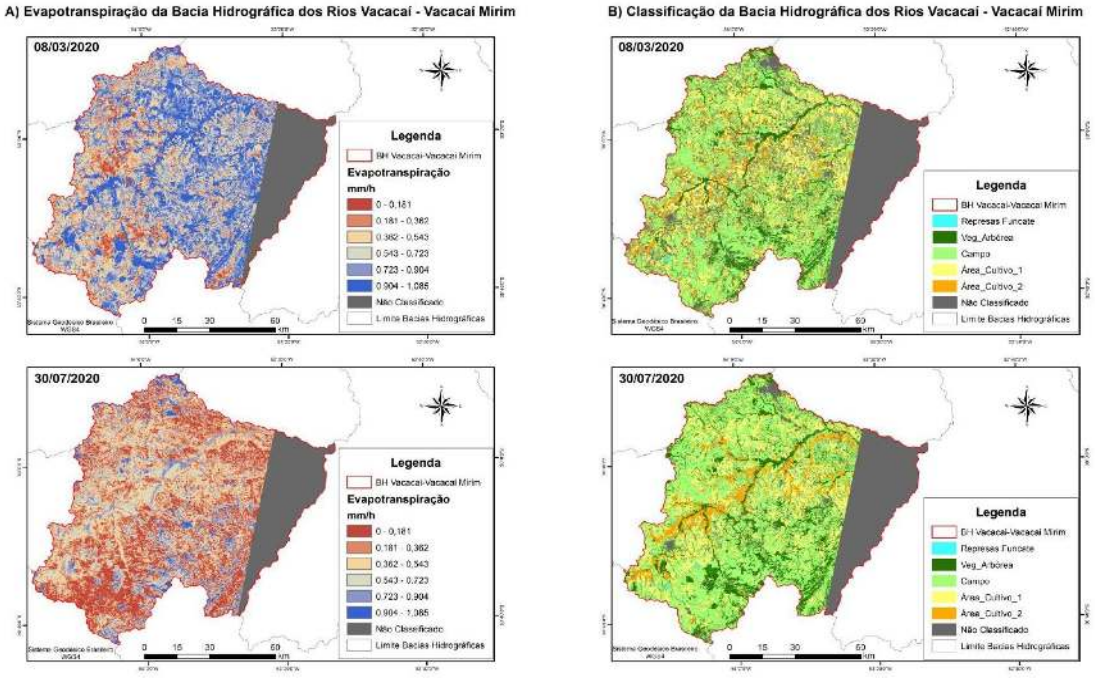
Figura 6 - A) Mapa de TS (ºC) de inverno/2013 e verão/2014; B) Mapa de NDVI de inverno/2013 e verão/2014.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para as imagens de verão/2020 e inverno/2020, os valores de ETi variaram de 0 a 0,85mm/h e 0 a 0,62mm/h, respectivamente, sendo menores valores verificados em áreas de campo e áreas de cultivo 2, enquanto os maiores valores foram encontrados em áreas com coberturas de vegetação arbórea e cultivo agrícola 1 (Figura 7). Na variação espacial observada na pesquisa de Silva et al. (2015) verificou-se maiores médias de evapotranspiração diária (ETr) em áreas de mata nativa (6,60 $mm.dia^{-1}$) e menores valores em áreas desprovidas de vegetação, sendo solo exposto (0,34 $mm.dia^{-1}$).

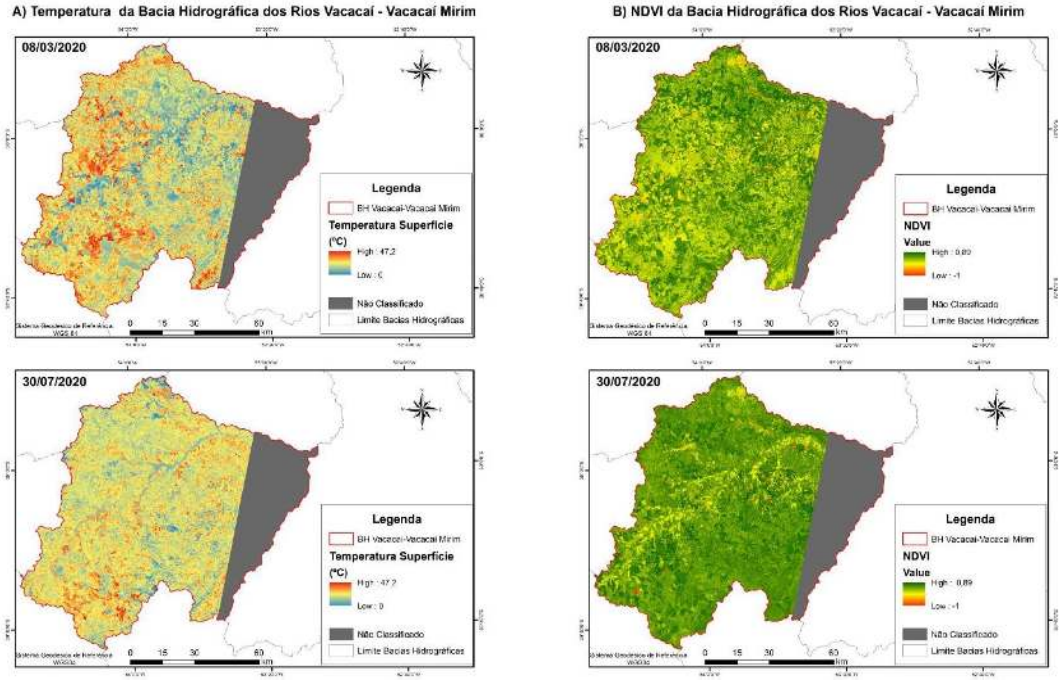
Figura 7 - A) Mapa de ETi inverno/2020 e verão/2020; B) Mapa da cobertura do uso do solo de inverno/2020 e verão/2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Enquanto para imagem de inverno/2020 foi verificado uma variação de TS entre 9,5 a 18,79°C e NDVI de -1 a 0,87, para imagens de verão/2020 houve uma variação de 23,7 a 40,43°C para TS, e para NDVI foram verificados valores entre -0,54 a 0,89 (Figura 8). Resultados semelhantes foram apontados por Guilherme et al. (2020), onde regiões com maiores valores de índices de vegetação apresentaram menores valores de temperatura da superfície.

Figura 8 - A) Mapa de TS (°C) de inverno/2020 e verão/2020; B) Mapa de NDVI de inverno/2020 e verão/2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A partir do cálculo do coeficiente de Pearson foi possível verificar correlações estatisticamente significativas (α = 0,05) entre ETi, TS e NDVI em todas as imagens analisadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de correlação entre variáveis para datas de verão e inverno.

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO				
	28/08/2013	19/01/2014	08/03/2020	30/07/2020
ETI – TS	-0,91	-0,95	-0,95	-0,73
ETI- NDVI	0,30	0,70	0,74	0,30
TS - NDVI	-0,43	-0,69	-0,75	-0,54

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A partir da tabela 1 pode-se observar em todas as datas analisadas correlação negativa de grau forte entre ETi e TS. Nos mapas de cobertura do solo, áreas com vegetação rasteira (campo e área de cultivo 2) apresentaram maiores valores de TS e menor ETi. No estudo desenvolvido por Sun et al. (2016), foi observado a relação negativa entre evapotranspiração e TS, em condições de limitação de água, onde a transpiração da planta e o armazenamento de umidade no solo explicam a relação entre estas variáveis.

Para os valores de TS e NDVI verificou-se correlação negativa de grau regular, desta forma, à medida que o NDVI aumenta, os valores de TS tendem a diminuir. Diferentes estudos (Cruz, 2019; Yue, et al., 2007; Paula, Pimentel e Ferreira, 2016), ao analisarem a relação entre TS e NDVI para diferentes tipos de cobertura do solo, também verificaram correlação inversa entre TS e NDVI, áreas com baixo índice de vegetação apresentam maiores temperaturas.

Ainda, para as variáveis de ETi e NDVI, foram verificados correlação positiva de grau regular para o período de inverno e verão, nas coberturas analisadas foi verificado que os maiores valores dessas variáveis ocorreram em coberturas de cultivo agrícola e em vegetação arbórea (Figura 3 e 4), em função da densidade da cobertura. Resultados semelhantes foram encontrados por Viana, Gonçalves e Rotunno Filho (2013), que identificaram valor de correlação entre NDVI e Evapotranspiração de 0,20 para a sub-bacia Manuel Duarte, enquanto para sub-bacia Ponte do Souza -0,76, no período de 1996 a 2006.

Com o objetivo de verificar a mudança de cobertura do solo e sua influência em cada variável física, considerou-se as imagens de verão/2014 e verão/2020, sendo verificados os maiores valores de correlações entre os dados. Neste sentido, avaliando os pontos distribuídos na área de estudo, verificou-se oito situações de mudanças de cobertura do solo para o intervalo analisado (Tabela 2).

Tabela 2- Mudanças da cobertura do solo e dos valores de ETi (mm/h), TS (°C) e NDVI

Situação	Classes Verão/2014	Classes Verão/2020	ETi 2014	ETi 2020	TS 2014	TS 2020	NDVI 2014	NDVI 2020
1	area_cultivo1	area_cultivo2	0,78	0,45	29,07	31,72	0,75	0,48
2	area_cultivo1	Campo	0,71	0,42	30,11	31,93	0,73	0,59
3	area_cultivo2	area_cultivo1	0,51	0,65	33,31	27,37	0,51	0,78
4	area_cultivo2	Campo	0,36	0,46	35,61	30,91	0,45	0,61
5	Campo	area_cultivo1	0,55	0,63	32,50	28,01	0,59	0,79
6	Campo	area_cultivo2	0,54	0,37	32,88	32,76	0,53	0,46
7	veg_arborea	area_cultivo1	0,85	0,63	28,35	28,14	0,75	0,72
8	veg_arborea	Campo	0,70	0,61	30,98	29,44	0,71	0,67

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Com os dados da Tabela 2, foi possível verificar a influência das mudanças de cobertura do solo nas variáveis físicas estudadas. Cabe destacar que nas situações 1

(conversão para solo exposto) e 3 (conversão para área cultivo 1) verificou-se as maiores diferenças nos valores de ETi, NDVI e TS. Para variável de TS, na Situação 1 ocorreu um aumento de aproximadamente 2,65°C, enquanto para Situação 3 um decréscimo de aproximadamente 5,94°C. Para os valores de NDVI, foi verificado uma diferença de 0,27 para Situação 1, em contrapartida um acréscimo foi verificado na Situação 3. Na Situação 1, um decréscimo significativo na variável ETi de 0,33mm.dia^{-1}, enquanto na Situação 3 um aumento de 0,14mm.dia^{-1} na mudança para área cultivo 1. Os maiores valores de ETi e NDVI foram encontrados em áreas de vegetação densa e sem restrição hídrica, enquanto maiores valores de TS foram verificados em áreas com cobertura vegetal rasteira ou em solo exposto. Foram verificadas as seguintes mudanças, campo correspondeu a 40% em 2014 e 33% em 2020, área de cultivo 1, 15% para 2014 e 22% em 2020, área de cultivo 2, 11% em 2014 e 9% em 2020 e para vegetação árbórea não houve variação significativa, correspondendo a 11%.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do algoritmo SEBAL em dados orbitais, permitiu identificar a variação da evapotranspiração instantânea em diferentes coberturas do solo na área bacia hidrográfica. A partir dos resultados obtidos, foi verificado correlação negativa de grau forte entre ETi e TS. No entanto, entre ETi e NDVI apresentaram correlação positiva de grau regular. Os valores médios observados das variáveis de ETi, TS e NDVI concordam com o tipo de cobertura, variando conforme o uso do solo, e densidade da vegetação. A análise temporal demonstrou ser eficaz para o monitoramento das mudanças de cobertura do solo e para possíveis impactos ambientes a partir da alteração dos valores das variáveis supracitadas.

Desta forma, pode-se dizer que os produtos e técnicas de sensoriamento remoto colaboraram para a análise da área de estudo, entretanto, a resolução espacial das imagens pode ser apontada como uma limitação na diferenciação mais refinada entre os tipos de cobertura do solo. Imagens de melhor resolução espacial poderiam melhorar a identificação de diferentes tipos de cultivos agrícolas, o que não foi possível nesta pesquisa. Para pesquisas futuras, sensores com melhor resolução espacial podem ser combinados com a série Landsat, de forma a detalhar as diferentes classes e mudanças de cobertura do solo na área da bacia hidrográfica, assim como para o bioma Pampa.

Por fim, destaca-se a importância da aplicação do estudo em bacias hidrográficas

sendo útil para o monitoramento e acompanhamento de áreas com coberturas vegetativas, para o controle da temperatura e da evapotranspiração, visando suas potencialidades para o uso da água.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de estudos que oportunizou o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Richard; TASUMI, Masahiro; TREZZA, Ricardo; BASTIAANSSEN, Wilhelmus Gerardus Maria; WATERS, Ralf. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) - Advanced Training and Users Manual.** v. 1, Idaho Implementation**,** 2002.

ATAÍDE, Kleber Renato da Paixão. **Modelagem de Determinação da Evapotranspiração Real para o Bioma Cerrado por Meio de Dados De Sensoriamento Remoto Orbital**. 2012. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ARRAES, Francisco Dirceu Duarte; ANDRADE, Eunice Maia de; SILVA, Bernardo Barbosa da Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 119-127, jan./mar. 2012.

BASTIAANSSEN, Wilhelmus Gerardus Maria. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain:** A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 1995.

BASTIAANSSEN, Wilhelmus Gerardus Maria. SEBAL-based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, p. 87-100, 2000.

BRUTSAERT, Wilfried. **Hydrology An Introduction**. Cambrigde University Press. 1. ed. New York, 2005.

COSTA, Marcos Côrtes. **Estimativa da Evapotranspiração Regional por Meio de Imagens Orbitais**. 1997. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

CRUZ, Gilson Campos Ferreira da. A Correlação entre Vegetação e Temperatura de superfície terrestre em Ponta Grossa-PR. *In:* SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 8., 2019, Três Rios. **Anais** [...]. Três Rios, 2019.

FUJACO, Maria Augusta Gonçalves; LEITE, Mariangela Garcia Praça. Padrões da evapotranspiração e índice de NDVI nos diferentes usos de cobertura do solo em três sub bacias do rio Paracatu/MG. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2013, Foz do Iguaçu**. Anais** [...]. São José dos Campos, SP, 7492-7498, abr. 2013. Disponível em: http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.29.34/doc/p0467.pdf. Acesso em: 15 ago. 2021.

FECHINE, Jose Alegnoberto Leite; GALVÍNCIO, Josicleda Domiciano. Índice de vegetação por diferença normalizada das cidades de Salgueiro, Mirandiba, Carnaubeira da Penha e Floresta – localizadas no semiárido pernambucano. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.2, n.3, p. 60-67, jul. 2008.

FOLHES, Marcelo Theophilo. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. 2007. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

GOMES, Heliofábio Barros. **Balanço de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. 2009. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2009.

GUILHERME, Adriano Pereira; BIUDES, Marcelo Sacardi; MOTA, Deniz dos Santos; MUSIS, Carlo Ralph de. Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície. **Sociedade & Natureza**, [*s.l.*], EDUFU, v. 32, p. 539-550, ago. 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.14393/sn-v32-2020-47462.

ISMAEL FILHO, Antônio; BORGES, Péricles de Farias; ARAÚJO, Lázaro de Souto; PEREIRA, Alécio Rodrigues; LIMA, Ewerton Matias de; SILVA, Leandro dos Santos; SANTOS JUNIOR, Carlos Vital dos. Influência das Variáveis Climáticas sobre a Evapotranspiração. **Gaia Scientia**, [*s.l.*], PRODEMA, v. 9, n. 1, p. 62-66, abr. 2015.

LANZA, Regis; VALENTE, Mirian Lago; RODRIGUES, Miriam Fernanda; REICHERT, José Miguel; MINELLA, Jean Paolo Gomes; BRAGA, Fabiano de Vargas Arigony; CAVALCANTE, Rosane Barbosa Lopes. Perdas de Água e Solo e Erosividade das Chuvas em Campo Nativo e Povoamento de Eucalipto no Bioma Pampa, São Gabriel-RS. *In:* ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 11., 2014, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa - PB, 2014.

LIMA, Evaldo de Paiva; SEDIYAMA, Gilberto Chohaku; ANDRADE, Ricardo Guimarães; LOPES, Vinícius Duarte; SILVA, Bernardo Barbosa da. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Revista Ceres**, [*s.l.*], FapUNIFESP (SciELO), v. 61, n. 1, p. 17-27, fev. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s0034-737x2014000100003.

LIMA, Walter de Paula. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. [*S.l.*], 1986.

MENDES, Carlos; GIACOMONI, Marcio. Estimativa da Evapotranspiração Regional por meio de Técnicas de Sensoriamento Remoto Integradas a Modelo de Balanço de Energia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [*s.l.*], FapUNIFESP (SciELO), v. 13, n. 4, p. 33-42, out./dez. 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n4.p33-42.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: factor analysis approach. **Water Resources Management**, [*s.l.*], Springer Science and Business Media, v. 10, n. 1, p. 1-20, fev. 1996. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/bf00698808.

OLIVEIRA, Jean Gonçalves; AIRES, Lucas Soares da Silva; SILVA JÚNIOR, José Wilson Batista da; ANGELLINI, Lucas Peres. Relação espaço-temporal entre NDVI e Temperatura da Superfície no sudoeste goiano. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO 19.,2019, Santos, SP. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 3220-3223, abr. 2019. Disponível em: https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/relacao-espaco-temporal-entre-ndvi-e-temperatura-da-superficie-no-sudoeste-goiano?lang=pt-br#. Acesso em: 07 maio 2021.

PACHECO, Admilson Penha; CERQUEIRA, Michelle Adelino; SILVA, Bernardo Barbosa; NICÁCIO, Rosilene Mendonça. Análise espaço temporal da evapotranspiração na área de preservação ambiental da Ilha de Santa Rita, Alagoas, Brasil. **Revista Árvore**, [*s.l.*], FapUNIFESP (SciELO), v. 38, n. 3, p. 453-460, jun. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622014000300007.

PAULA, Isabela Fernanda Moraes de; PIMENTEL, Franciele de Oliveira; FERREIRA, Cássia de Castro Martins. Correlação entre a Temperatura De Superfície e o Índice Vegetativo no Perímetro Urbano de Juiz de Fora - MG. **Revista de Geografia**, [*s.l.*], PPGEO - UFJF, v. 6, n. 4, p. 340-351, dez. 2016.

PEREIRA, Clarissa Cardoso; MARIANO, Zilda de Fátima; WACHHOLZ, Flávio; CABRA, João Batista Pereira. Análise da Temperatura de Superfície e do Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia Barra dos Coqueiros (Goiás). **Revista Geonorte**, [*s.l.*], UFAM, v. 2, n. 5, p. 1243-1255, out. 2012.

RICHARDS, John. A. **Remote sensing digital image analysis: An Introdution**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1993.

SCHOTT, John. R. **Remote Sensing: the image chain approach**. 1. ed. New York: Oxford University, 1997.

SILVA, Bruno Bonemberger da; ARAUJO, Fernanda Cristina; MERCANTE, Erivelto; BOAS, Marcio Antonio Vilas; WRUBLACK, Suzana Costa. Estimativa da evapotranspiração real diária para a microbacia do rio das Lontras utilizando algoritmo SEBAL e imagens Landsat 8. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa, PB. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 3903-3910, abr. 2015. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0774.pdf. Acesso em: 07 maio 2021.

SUN, Zhigang; WANG, Qinxue; BATKHISHIG, Ochirbat; OUYANG, Zhu. Relationship between Evapotranspiration and Land Surface Temperature under Energy - and Water-Limited Conditions in Dry and Cold Climates. **Advances In Meteorology**, [*s.l.*], Hindawi Limited, v. 2016, p. 1-9, jan. 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2016/1835487.

TONELLO, Kelly Cristina. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG.** 2005. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

VIANA, Lude Quièto; GONÇALVES, Rodrigo Costa; ROTUNNO FILHO, Otto Corrêa. Avaliação espaço-temporal do NDVI com a precipitação e com a evapotranspiração na Bacia do Rio Preto RJ/MG. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRH, 1-8. nov. 2013 Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/5af979f74aef82c8b20fd9bb0103768b_43d945a44a7fcfc9790f16b4ebc9c3e1.pdf. Acesso em: 11 maio 2021.

YUE, W; XU, Jianhua; TAN, W; XU, L. The relationship between land surface temperature and NDVI with remote sensing: application to shanghai landsat 7 etm+ data. **International Journal Of Remote Sensing**, [*s.l.*], Informa UK Limited, v. 28, n. 15, p. 3205-3226, ago. 2007. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/01431160500306906.