



ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS E NDVI EM FRAGMENTOS FLORESTAIS DO BIOMA MATA ATLÂNTICA

Roberto Wagner Lourenço¹
Bruna Henrique Sacramento²

Mudanças climáticas

Resumo

Diante da importância das florestas na regulação climática, estudos para melhorar o entendimento sobre sua influência no balanço de energia podem contribuir para compreensão da dinâmica florestal e equilíbrio climático. O objetivo do presente trabalho foi verificar a relação entre o Índice de Vegetação Normalizada (NDVI) e as variáveis calor latente, calor sensível, temperatura ambiente, densidade de CO₂ e de H₂O entre os meses de julho de 2020 e junho de 2021. O estudo foi realizado em um fragmento florestal da Bacia Hidrográfica do Rio Una, localizada em Ibiúna, Estado de São Paulo, Brasil, e que conta com uma estação de monitoramento de variáveis microclimáticas. O NDVI do fragmento foi obtido de imagens dos satélites Sentinel-2 (L2A) para cada mês do período analisado. Os dados microclimáticos foram levantados da torre de monitoramento local por equipamentos da *Campbell Scientific*. Foi elaborada uma matriz de correlação entre os dados analisados no estudo. Os resultados mostram NDVI pouca variação dos valores médios ao longo do período do analisado, indicando para floresta em avançado estado de conservação e de fitofisionomia Floresta Ombrófila Densa. Foram constatadas correlações entre as variáveis microclimáticas e o NDVI que comprovam a importância da saúde da vegetação nos ciclos de evapotranspiração e sua atuação como sumidouro CO₂. Estudos desta natureza são de suma importância para compreensão da dinâmica do bioma Mata Atlântica, que possui alto potencial na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Índice de Vegetação; Sensoriamento Remoto; Balanço de energia; Mudanças climáticas.

¹Prof. Dr. UNESP, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba – Departamento de Engenharia Ambiental, roberto.lourenco@unesp.br.

²Aluna do Curso de Doutorado em Ciências Ambientais, UNESP, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, brunahsacramento@gmail.com.



INTRODUÇÃO

As altas porcentagens de perdas de áreas florestais no mundo têm reforçado a necessidade de pesquisas sobre o uso da terra e das florestas. Sabendo-se da importância que as florestas exercessem sobre a absorção de CO₂ atmosférico e no equilíbrio ecossistêmico perdido com a supressão das florestas primárias, estudos relacionados a preservação e conservação se mostram de suma importância para a proteção da biodiversidade e para o balanço hidrológico (CHEN *et al.*, 2019).

Além disso, as florestas têm cada vez mais um papel preponderante no clima, em especial no ciclo hidrológico e na composição atmosférica, fatores de grande relevância nas mudanças climáticas globais, tendo em vista o potencial de atenuar ou ampliar as alterações climáticas antropogênicas (BONAN, 2008; VANINO *et al.*, 2018)

Porém, estudos da dinâmica florestal, relacionando tanto a abordagem temporal como espacial, são em grande parte bastante limitados em nível de campo, uma vez que requerem grande esforço amostral, além de gastos excessivos com equipamentos e vários anos de continuidade de observações, principalmente em âmbito de bacias hidrográficas (LOURENÇO *et al.*, 2015; BALESTRIN *et al.*, 2019; AMORIM; SOUSA; LOURENÇO, 2019).

Nesse sentido, para o entendimento do balanço de energia e o desenvolvimento de modelos que possam demonstrar o potencial das florestas em contribuir com o equilíbrio climático, em especial nos estudos das interações floresta-atmosfera (VON RANDOW *et al.*, 2012), cada vez mais tem se tornando usual utilizar as ferramentas de Sensoriamento Remoto. O Sensoriamento Remoto tem se apresentado como uma ferramenta promissora para avaliações tanto no aspecto hidrológico como meteorológico, proporcionando medidas com informações espacialmente contínuas, inclusive sobre superfícies vegetadas, suprimindo a lacuna de dados locais necessários para alimentar modelos em escala regional, ou até mesmo global (DUVEILLER; HOOKER; CESCATTI, 2018; LAUSCH *et al.*, 2018).

Nesse sentido, estudar fatores relacionados ao padrão de comportamento do balanço de energia em florestas por meio de ferramentas de análise temporal e espacial, utilizando dados de sensoriamento remoto e variáveis microclimáticas, podem contribuir de forma

significativa para a conservação e preservação das florestas, bem como para o entendimento das variações climáticas em escala local (JIANG *et al.*, 2013; BERVEGLIERI *et al.*, 2018).

Assim, um dos mais utilizados indicadores que permite verificar de forma indireta os estados de conservação das florestas diz respeito ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é detectado remotamente e é função explícita de fatores estruturais relacionados a biomassa, área foliar, densidade e estrutura das florestas (BEZERRA *et al.*, 2014; FERNANDES *et al.*, 2019).

Além disso, outras variáveis que podem indicar uma estreita relação com a conservação das florestas são as chamadas variáveis micrometeorológicas, tais como o fluxo de carbono, calor sensível, calor latente, fluxo de dióxido de carbono e o vapor d'água.

Desta forma, este trabalho faz parte de um projeto de monitoramento que tem como escopo a obtenção de medidas obtidas de uma torre de monitoramento que tem como objetivo principal desenvolver um modelo matemático que possa caracterizar diferentes estados de conservação de fragmentos florestais, visando colaborar com o monitoramento e entendimento da influência das florestas nas variações do balanço de energia (WATERS *et al.*, 2018).

Nesta etapa, é apresentado estudo que busca verificar a relação entre o NDVI com as variáveis calor latente (LE), calor sensível (H), temperatura ambiente (T_{amb}), densidade de CO_2 (D_{CO_2}) e de H_2O (D_{H_2O}) entre os meses de julho de 2020 e junho de 2021.

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado sobre um fragmento florestal da Bacia Hidrográfica do Rio Una (Figura 1), localizada no município de Ibiúna, a sudeste do Estado de São Paulo. A bacia hidrográfica possui cerca de 98 km² e seu curso principal é um dos afluentes do Rio Sorocaba, que pouco após sua origem é represado para formação do Reservatório Itupararanga. Esta é uma represa de importância regional, visto que é manancial de abastecimento público de água da região e também utilizado para geração de energia



elétrica.

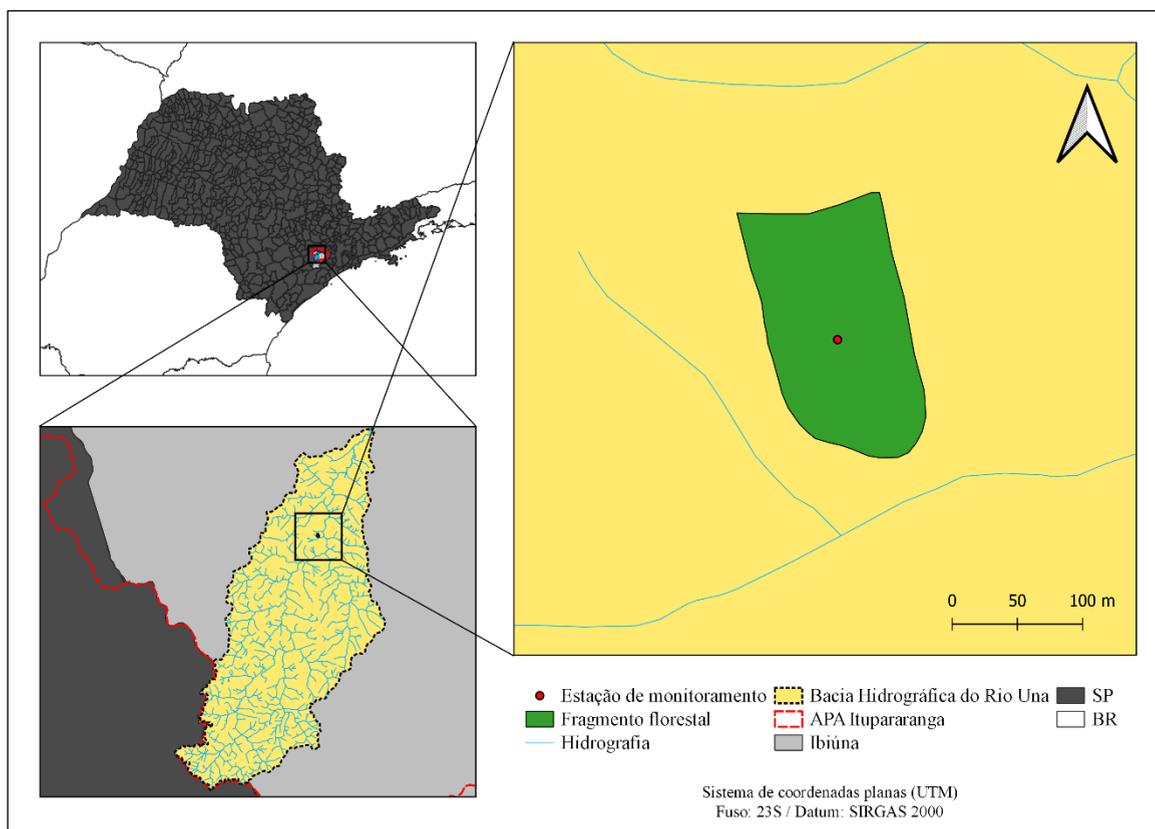


Figura 1: Localização da área de estudo.

A área de estudo insere-se na Área de Preservação Ambiental (APA) Itapararanga, que possui importância para a conservação da biodiversidade local. De acordo com o estudo realizado pelo Programa BIOTA/FAPESP (2008), esta unidade de conservação é uma área de grande relevância para conservação dos fragmentos florestais do Estado de São Paulo (RODRIGUES; BONONI, 2008; FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2009).

A região possui remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica, no domínio das Florestas Ombrófilas Densas, compostos por florestas secundárias ou formações pioneiras (FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2009). O bioma Mata Atlântica desempenha o importante serviço ecossistêmico de regulação climática (SALAZAR *et al.*, 2016).

A área de estudo possui clima 50 a 80% Cwa (Clima temperado úmido, com inverno seco e verão quente) da classificação de Köppen, conforme Dubreuil *et al.* (2017) e

Padovanni *et al.* (2018). A pluviosidade anual é de cerca de 1350 mm e a temperatura média é próxima a 19°C (PADOVANNI *et al.*, 2018).

Foram utilizados dados referentes a uma estação de monitoramento de variáveis microclimáticas instalada em um fragmento florestal com peculiaridades inerentes à proposta da pesquisa, por ser bastante preservado, ser uma localidade com declividade inferior a 20% além de estar inserida no domínio do bioma Mata Atlântica (Figura 1).

ANÁLISE REMOTA DOS FRAGMENTOS FLORESTAIS

A partir de imagens dos satélites Sentinel-2 (L2A, 10 metros de resolução espacial, baixadas e convertidas de Números Digitais para valores de reflectância de superfície por meio do complemento *Semi-Automatic Classification Plugin*, SCP, no QGIS 3.16.7), foi obtido o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do período de julho de 2020 a junho de 2021 (LOUIS *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2018; ESA, 2019; QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2020). Os valores do NDVI foram obtidos a partir das intensidades de reflectância dos canais do infravermelho próximo e vermelho de cada pixel das imagens orbitais obtidas do período analisado, calculado conforme a equação a seguir, também no QGIS 3.16.7 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2020).

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (1)$$

Legenda: *NDVI* = índice de vegetação por diferença normalizada; *IVP* = corresponde a banda espectral do infravermelho próximo e; *V* = corresponde a banda espectral do vermelho.

Foram amostrados os valores por *pixel* da imagem gerada para tabulação dos dados no Microsoft Excel 2016 e cálculo das médias mensais do NDVI no fragmento florestal estudado.

OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS

Os valores de LE ($W \cdot m^{-2}$), H ($W \cdot m^{-2}$), T_{amb} (°C), D_{CO_2} ($mg \cdot m^{-3}$) e de D_{H_2O} ($g \cdot m^{-3}$), foram obtidos de um equipamento instalado em uma torre de 20 metros sobre um fragmento florestal (Figura 1) onde está instalado um analisador de gás de absorção de infravermelho



de caminho aberto, integrado a um anemômetro sônico tridimensional (IRGASON, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.). O analisador de gás fornece medições de densidades absolutas de dióxido de carbono e vapor de água, enquanto o anemômetro sônico mede os componentes ortogonais do vento.

Acoplado ao Irgason está um *datalogger* CR6OP equipado com o programa EasyFlux® que permite o registro dos dados de fluxo totalmente corrigidos de CO₂, LE, H, T_{amb}, D_{CO2} e D_{H2O}, além de uma sonda para medidas de temperatura sônica e pressão atmosférica, entre outras do anemômetro sônico que não serão tratados neste trabalho. Estas e outras variáveis permite ao Sistema de covariância (EC) analisar o balanço de energia da superfície florestada. As equações para o cálculo das variáveis podem ser encontradas no site da *Campbell Scientific* (2021).

ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES

A análise das possíveis correlações entre as variáveis NDVI e as medidas obtidas do CR6OP EasyFlux® foi feita de acordo utilizando uma matriz de correlação, a qual foi calculada para verificar as possíveis associações lineares existente entre as variáveis LE, H, T_{amb}, D_{CO2} e D_{H2O}, cujo resultado é um índice sem dimensão. O mesmo é situado entre -1 e 1 e reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Foi usado o Microsoft Excel 2016 para calcular a matriz de correlação (nível de significância igual a 95%) entre as variáveis determinadas anteriormente, conforme a equação abaixo.

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE REMOTA DOS FRAGMENTOS FLORESTAIS

A Figura 2 contém as imagens resultantes do cálculo do NDVI na área de estudo. Por meio desta figura é possível observar um predomínio de valores superiores a 0,7, que indicam média a alta cobertura vegetal com bom vigor e são condizentes com um fragmento florestal com estado avançado de conservação e preservação (KÄFER; REX, 2020).

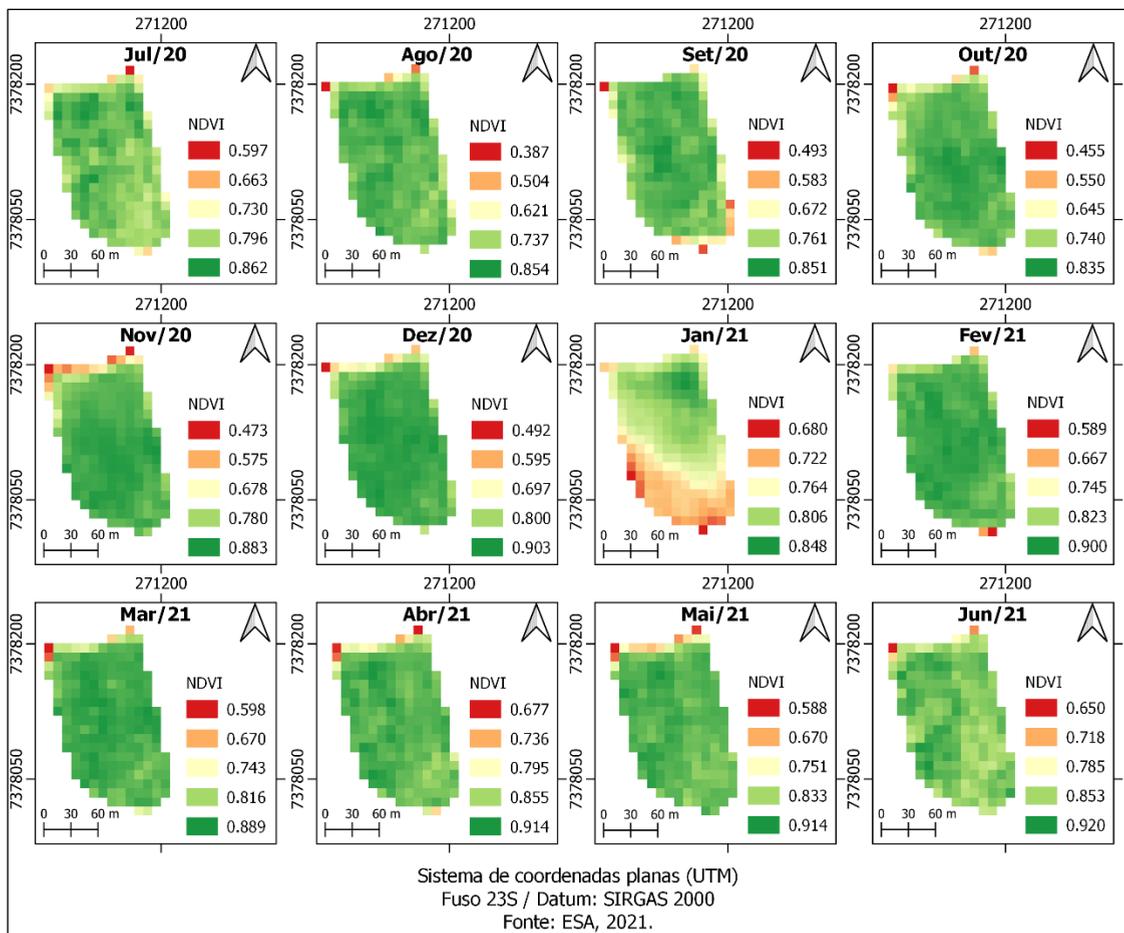


Figura 2: Recortes mensais do NDVI no fragmento florestal estudado.

OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS

A Tabela 1 contém as médias das medidas aferidas na estação de monitoramento localizada na área de estudo, bem como as médias mensais de NDVI obtidos por produtos orbitais para o período analisado.



Tabela 1: Valores levantados por sensoriamento remoto orbital (NDVI) e estação de monitoramento (demais medidas)

PERÍODO	LE	H	T _{AMB}	D _{CO2}	D _{H2O}	NDVI
JUL/20	52,98	27,05	15,73	697,63	9,35	0,811
AGO/20	44,82	41,81	15,37	675,50	7,75	0,787
SET/20	64,31	51,60	19,52	664,56	9,33	0,790
OUT/20	65,99	45,60	19,17	656,99	9,99	0,781
NOV/20	69,19	49,09	19,02	630,81	9,76	0,825
DEZ/20	84,42	37,35	20,82	620,45	12,50	0,861
JAN/21	92,29	30,26	21,95	614,43	13,86	0,778
FEV/21	73,00	32,05	20,90	616,61	12,80	0,867
MAR/21	91,46	30,49	21,52	619,84	13,28	0,858
ABR/21	42,17	20,72	17,59	605,44	10,33	0,878
MAI/21	50,58	15,44	15,78	630,44	8,64	0,865
JUN/21	39,21	14,81	16,34	629,66	9,36	0,869

A variação dos valores de NDVI é baixa ao longo do período analisado pois a fitofisionomia Floresta Ombrófila Densa, predominante na área de estudo, possui ciclo de vida mais perene com pouca ou nenhuma variação entre as estações do ano (CORDEIRO *et al.*, 2017).

ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES

A Tabela 2 contém o resultado da análise de correlação dos dados aferidos para a localidade de estudo. É possível notar uma correlação negativa entre NDVI e D_{CO2}. Este resultado indica que o fragmento florestal analisado tem atuado como sumidouro de dióxido de carbono. Por se tratar de um remanescente florestal de estado avançado de conservação e preservação, os resultados são condizentes com a literatura. De acordo com Capellesso *et al.* (2021), fragmentos florestais podem atuar, mutuamente, como estoques de carbono e detentores de biodiversidade e quanto mais antigos (e conservados) estes remanescentes, mais intensos são estes serviços ecossistêmicos.

Tabela 2: Matriz de correlação das médias das variáveis microclimáticas e NDVI levantados para a área de estudo

	LE	H	T _{AMB}	D _{CO2}	D _{H2O}	NDVI
LE	1,000					
H	0,352	1,000				
T _{AMB}	0,915	0,344	1,000			
D _{CO2}	-0,353	0,342	-0,539	1,000		
D _{H2O}	0,850	-0,043	0,895	-0,626	1,000	
NDVI	-0,132	-0,628	-0,033	-0,589	0,178	1,000

Ainda conforme os resultados da Tabela 2, LE e D_{H2O} possuem alta correlação (0,850). Uma vez que LE se trata da grandeza física relacionada à quantidade de energia necessária para a mudança de estado físico da matéria de uma substância, novamente, os resultados são condizentes. De acordo com Machado *et al.* (2020), superfícies com vegetação densa e perfil de biomassa radicular ativa extrai água de forma mais eficiente para evapotranspiração. Os autores também reforçam sobre o impacto do desflorestamento no fluxo de energia local, portanto, práticas conservacionistas são importantes para se evitar perturbações neste ciclo.

A correlação entre T_{amb} e LE também é bastante alta (a maior dentre as avaliadas na Tabela 2). Apesar de não serem grandeza diretamente relacionadas, a alta correlação entre elas pode ser atribuída ao processo de evapotranspiração, que é uma forma de saída de água do ciclo hidrológico na forma de vapor d'água, demandar LE, mas ser diretamente proporcional à T_{amb} conforme diversas investigações já realizadas (BORGES JÚNIOR; PINHEIRO, 2019; FERREIRA *et al.*, 2019). Porém, esta é uma relação que demanda mais análises para total compreensão.

CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar a relação entre o NDVI e algumas variáveis microclimáticas obtidas *in situ* em um fragmento florestal de Mata Atlântica. De acordo



com as análises, foi baixa a variação no comportamento espectral do remanescente florestal estudado, mas isso se justifica por sua fitofisionomia (Floresta Ombrófila Densa).

Com relação às variáveis climáticas e o índice de vegetação, se verificou uma forte correlação negativa do NDVI com D_{CO_2} e isto demonstra que o fragmento florestal analisado atua como sumidouro deste gás de efeito estufa. Também foi possível constatar correlações positivas entre LE e D_{H_2O} e LE e T_{amb} , tendo o fenômeno de evapotranspiração como possível explicação para estes resultados, mas são necessários mais estudos para confirmar esta premissa.

Estudos desta natureza são de suma importância para compreensão da importância de fragmentos florestais no balanço de energia, em especial, da Mata Atlântica. Este é um bioma que possui potencial contribuição na mitigação de impactos negativos decorrentes de mudanças climáticas, tanto pela captura de gases de efeito estufa e quanto pela conservação da biodiversidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AMORIM, A. T.; SOUSA, J. A.; LOURENÇO, R. W. Indicador dos Estágios de Sucessão de Fragmentos Florestais do Bioma Mata Atlântica. **REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE)**, v. 71, p. 756-780, 2019.

BALESTRIN, D. *et al.* Phytosociological study to define restoration measures in a mined area in Minas Gerais, Brazil. **Ecological Engineering**, v. 135, p. 8-16, 2019.

BERVEGLIERI, A. *et al.* Successional stages and their evolution in tropical forests using multi-temporal photogrammetric surface models and superpixels. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 146, p. 548-558, 2018.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 7, p. 709-717, 2011. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n7/v15n07a09.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

BONAN, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. **Science**, v. 320, p. 1444-1449, 2008. [DOI: 10.1126/science.1155121].

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; PINHEIRO, M. A. B. Daily Reference Evapotranspiration Based on Temperature for Brazilian Meteorological Stations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 145, n. 12, p. 04019029, 2019.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Easy Flux DL CR6OP**: Product Manual. Disponível em:
<<https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/easyflux-dl-cr6op.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2021.

CAPELLESSO, E. S. *et al.* Co-benefits in biodiversity conservation and carbon stock during forest regeneration in a preserved tropical landscape. **Forest Ecology and Management**, v. 492, p. 119222, 2021.

CHEN, J. M. *et al.* Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. **Nature Communications**, v.10, n.1, p. 1-7. 2019.

CORDEIRO, A. P. A. *et al.* Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 883-896, 2017.

DUBREUIL, V. *et al.* Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **EchoGéo**, v. 41, p. 1-28, 2017.

DUVEILLER, G.; HOOKER, J.; CESCATTI, A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. **Nature communications**. v. 9, n. 679, p. 1-11, 2018.

ESA – European Space Agency. **Sen2Cor**. Disponível em: <<https://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>>. Acesso em: 03 out. 2019.

FERNANDES, A. C. G. *et al.* Utilização de intervalos de índices de vegetação e temperatura da superfície para detecção de queimadas, **Cad. Ciênc. Agrá.**, v. 8, n. 2, p. 30-40, 2016.

FERREIRA, L. B. *et al.* Estimation of reference evapotranspiration in Brazil with limited meteorological data using ANN and SVM—A new approach. **Journal of Hydrology**, v. 572, p. 556-570, 2019.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental (APA) Ituparanga**. 2009. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-apa-ituparanga/>>. Acesso em: 16 jul. 2021.

JIANG, P. *et al.* How well do the GCMs/RCMs capture the multiscale temporal variability of precipitation in the Southwestern United States?. **Journal of Hydrology**, v. 479, p. 75–85. 2013.



KÄFER, P. S.; REX, F. E. Avaliação espectral e temporal de remanescentes da mata atlântica com dados Spot-Vgt e variáveis meteorológicas. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 13-22, 2019.

LAUSCH, A. *et al.* Understanding and assessing vegetation health by in situ species and remote-sensing approaches. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 8, p. 1799-1809, 2018.

LI, C. *et al.* Estimating apple tree canopy chlorophyll content based on Sentinel-2A remote sensing imaging. **Scientific Reports**, v. 8, n. 3756, p. 1-10. 2018.

LOUIS, J. *et al.* **Sentinel-2 sen2cor: L2A processor for users**. Paris: European Space Agency, 2016.

LOURENÇO, R. W. *et al.* Use of fuzzy systems in the elaboration of an anthropic pressure indicator to evaluate the remaining forest fragments. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, p. 2481-2488, 2015.

MACHADO, N. G. *et al.* Impact of changes in surface cover on energy balance in a tropical city by remote sensing: A study case in Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100373, 2020.

PADOVANNI, N. G. *et al.* Análise espacial da temperatura e albedo de superfície na Bacia Hidrográfica do Rio Una-Ibiúna/São Paulo, a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1832-1845, 2018.

QGIS Development Team. QGIS Association. **QGIS 3.16 Hannover**. 2020.

RODRIGUES, R.R; BONONI, V.L.R. Conclusões. p.146-149. In: RODRIGUES, R.R. *et al.* **Diretrizes para conservação e restauração da biodiversidade no Estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, 238p, 2008.

SALAZAR, A. *et al.* Deforestation changes land-atmosphere interactions across South American biomes. **Global and Planetary Change**, v. 139, p. 97-108, 2016.

VANINO, S. *et al.* Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, p. 452-470, 2018.

VON RANDOW, R. C. S. *et al.* Evapotranspiration of deforested areas in central and southwestern Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 109, p. 205-220, 2012.

WATERS, R. *et al.* **SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land**: advanced training and users manual. Version 1.0. Nelson: The Idaho Department of Water Resources, 2002. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 12 maio 2018.