



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise de Modelos de Evapotranspiração por Sensoriamento Remoto na Caatinga: Uma Compreensão de Variações Temporais e Espaciais

Epitacio Pedro da Silva Neto¹, Ulisses Alencar Bezerra², Sabrina Holanda Oliveira³, John Cunha⁴

¹Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), CEP: 58109-970, Campina Grande/PB, Brasil, epitacio.pedro@estudante.ufcg.edu.br (autor correspondente) (<https://orcid.org/0009-0001-2337-8757>); ²Doutor em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande, ulisses.alencar17@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7016-5589>); ³Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande, sabrina.holanda.oliveira@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-0332-6447>); ⁴Professor do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, john.brito@ufcg.edu.br. (<https://orcid.org/0000-0002-1783-2343>)

Artigo recebido em 18/12/2023 e aceito em 19/06/2024

RESUMO

A evapotranspiração (ET) desempenha um papel crucial no ciclo da água, influenciando o clima local e sustentando os processos vitais no ambiente terrestre. É possível estimar a ET em nível regional utilizando modelos de balanço de energia à superfície (SEB) com dados de Sensoriamento Remoto (SR). Contudo, diferentes modelos SEB podem produzir resultados discrepantes, especialmente em ambientes sazonais e sensíveis à disponibilidade de água, como a Caatinga. Para investigar essas discrepâncias entre os modelos SEB, foram avaliados os modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI em uma sub-bacia do Alto Paraíba, inserida na Caatinga. A análise da ET em áreas de pastagem e Caatinga revelou comportamentos contrastantes. Espacialmente os modelos foram capazes de diferenciar a ET dos usos do solo, porém o SEBAL e S-SEBI apresentaram superestimativas na bacia, principalmente em áreas de Caatinga. Na pastagem, os modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI indicaram uma ET estável, abaixo de 2 mm/dia, tanto em períodos secos quanto chuvosos. Por outro lado, na Caatinga, houve uma redução significativa na ET durante a estação seca, demonstrando adaptação desta vegetação à escassez de água. O modelo STEEP, ao considerar a umidade do solo e a estrutura da planta em sua modelagem, apresentou uma representação mais precisa da Caatinga, enquanto os modelos SEBAL e S-SEBI mostraram limitações nesse contexto, devido às simplificações em seus algoritmos. Esses resultados ressaltam a importância de considerar as particularidades das vegetações ao modelar processos hidrológicos, especialmente em regiões com condições climáticas variadas, como a Caatinga. A compreensão dessas diferenças entre os modelos SEB é crucial para aprimorar as estimativas de ET em áreas sensíveis, fornecendo informações mais precisas para a gestão sustentável dos recursos hídricos nessas regiões.

Palavras-chave: Balanço de energia à superfície, Google earth engine, Ciclo hidrológico.

Analysis of Remote Sensing Evapotranspiration Models in the Caatinga: Understanding Temporal and Spatial Variations

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) plays a crucial role in the water cycle, influencing local climate and sustaining vital processes in the terrestrial environment. It is possible to estimate ET at a regional level using Surface Energy Balance (SEB) models with Remote Sensing (RS) data. However, different SEB models may yield discrepant results, especially in seasonal and water-sensitive environments such as the Caatinga. To investigate these discrepancies among SEB models, the STEEP, SEBAL, and S-SEBI models were evaluated in a sub-basin of Alto Paraíba within the Caatinga. Analysis of ET in pasture and Caatinga areas revealed contrasting behaviors. Spatially, the models were able to differentiate ET from land use, however SEBAL and S-SEBI presented overestimates in the basin, mainly in Caatinga areas. In pastures, the STEEP, SEBAL, and S-SEBI models indicated stable ET, below 2 mm/day, during both dry and rainy periods. Conversely, in the Caatinga, there was a significant reduction in ET during the dry season, demonstrating the vegetation's adaptation to water scarcity. The STEEP model, considering soil moisture and plant structure in its modeling, provided a more accurate representation of the Caatinga, while the SEBAL and S-SEBI models showed limitations in this context, due to simplifications in their algorithms. These results emphasize the importance of considering vegetation particularities when modeling hydrological processes, especially in regions with varied climatic conditions like the Caatinga. Understanding these differences among SEB models is crucial to enhance ET estimates in sensitive areas, providing more precise information for sustainable water resource management in these regions.

Keywords: Surface energy balance; Google earth engine; Hydrologic cycle.

Introdução

A evapotranspiração (ET) é um processo chave nos ciclos de água, carbono e energia, combinando a perda de água por evaporação com a transpiração das plantas durante a fotossíntese (Zhang, 2016). A estimativa precisa da ET, tanto em escala regional quanto global, é essencial nas áreas de hidrologia, gestão de recursos hídricos, meteorologia e mudanças climáticas (Tang e Li, 2015; Gu et al., 2021). A importância de quantificar a ET se dá pelo seu papel no fechamento de balanços hidrológicos e de energia. O fechamento dos balanços hidrológico e de energia é uma das tarefas mais desafiadoras, pois sofre influência de um grande número de fatores ambientais e climáticos complexos, ex. propriedades do solo, condições atmosféricas, vegetação e topografia, no tempo e no espaço (Wang et al., 2016; Bhattarai et al., 2017). Diversas abordagens têm sido desenvolvidas para se obter a ET, incluindo técnicas de medição direta e modelagem (Allen et al., 2011).

A ET pode ser medida utilizando técnicas convencionais, tais como a Razão de Bowen, o sistema Eddy Covariance, mas essas medições in situ são limitadas em gerar estimativas tanto em termos de custo como de escala (Allen et al., 2011; Anapalli et al., 2016; McShane et al., 2017). Isso ocorre devido a dispersão dos locais de coleta de dados, juntamente com a representatividade espacial limitada, a descontinuidade e baixa amplitude temporal dos registros observados (Sullivan et al., 2019; Chu et al., 2021), que tornam a análise disponível apenas nos locais de coleta de dados e impede a possibilidade de capturar e atribuir as variações espaciais e temporais da ET (Tang et al., 2024). A ET é regulada por uma série de fatores que podem ser medidos através do Sensoriamento Remoto (SR), como aspectos radiativos, atmosféricos e fenológicos. Diversos modelos de ET foram desenvolvidos utilizando dados de SR obtidos por sensores a bordo de satélites ou aerotransportados, sendo reconhecido atualmente como o meio mais viável em termos financeiros e operacionais para obter informações de ET na superfície terrestre em escala local e regional (Gowda et al., 2008; Mu et al., 2011; Chen e Liu, 2020; Zhu et al., 2022). Os diversos métodos existentes para obtenção de ET por SR foram aplicados com sucesso para diferentes situações e condições climáticas, cada um com suas vantagens e desvantagens.

O desafio para a melhor estimativa de ET engloba o entendimento dos padrões de

comportamento espacial e temporal dessa variável e como diferentes métodos respondem a ele. Diversos estudos verificaram diferentes produtos de ET sob a validação de dados in situ. Como o estudo de Salazar-Martínez et al. (2022) que verificou produtos de SR em ambientes florestados e não florestados de diferentes faixas latitudinais. O resultado entre os produtos variou consideravelmente de acordo com as áreas estudadas e as categorias de vegetação. Em regiões não florestadas, não foi observado diferença na validação entre os modelos em distintas áreas de análise. Porém essa diferença foi notada para regiões florestadas, apresentando uma menor concordância principalmente em florestas sazonalmente secas do que em florestas de regiões úmidas. Hu et al. (2021) comparou modelos de diferentes abordagens como os de base física, de *data-driven* e modelos híbridos a fim de explorar ao máximo a precisão dos modelos e quais fatores mais influenciam a precisão desses modelos. Notou-se que os modelos *data-driven* dependem principalmente das variações do algoritmo de machine-learning e de técnicas de otimização, enquanto modelos de base física dependem principalmente do método de balanço de energia e do comprimento da rugosidade da superfície. Zhu et al. (2022) fez a validação de acurácia e incerteza de cinco produtos de ET por SR, e com base nos modelos de melhor validação local, concluiu que restrições físicas importantes, como precipitação, umidade do solo e estrutura da vegetação devem ser incorporadas em modelos de SR para seu máximo desempenho. Tang et al. (2024) analisou 25 produtos globais de ET com diversas fontes de dados, sendo eles produtos de reanálise, de SR, produtos híbridos, produtos de balanço hídrico e de machine learning. De acordo com essa análise os modelos de SR se destacaram por obter uma alta concordância com os dados medidos in-loco por torres de fluxo.

Em aplicações de larga escala, os métodos que usam a abordagem de modelos de balanço de energia à superfície (SEB) baseados em SR são considerados, atualmente, a maneira mais efetiva de capturar a variabilidade espacial e temporal dessa variável, em áreas extensas e heterogêneas (Tang e Li, 2014; Fisher et al., 2017; Trebs et al., 2021). A radiação solar disponível na superfície terrestre (R_n) é particionada em fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (λET) e fluxo de calor no solo (G) (Zhang, 2016). Elementos da superfície como plantas, solo e corpos hídricos

podem absorver a radiação solar e reemitir como λET , que está associado com a perda de água para atmosfera através da ET (Zhang, 2016). Os modelos SEB baseados em SR, obtêm a ET através do λET como resíduo do balanço de energia, subtraindo o G e H de R_n (Allen et al., 2011; Ferreira et al., 2020). Os desafios para a estimativa de ET como um valor residual está nas incertezas associadas ao cálculo de H (Gokmen et al., 2012; Paul et al., 2014; Costa-Filho et al., 2021; Bezerra et al., 2023), visto que R_n e G têm estimativas relativamente precisas com o uso de SR e de relações empíricas de características de solo, vegetação e temperatura de superfície (Allen et al., 2011; Ferreira et al., 2020; Danelichen et al., 2014). O cálculo de H envolve variáveis relacionadas à resistência aerodinâmica para transferência de calor (r_{ah}) e ao gradiente de temperatura (dT), que podem diminuir o desempenho dos modelos SEB se mal estimadas (Gokmen et al., 2012; Costa-Filho et al., 2021; Liu et al., 2021).

Em virtude dos modelos SEB, em geral, terem sido avaliados e/ou parametrizados em ecossistemas e climas localizados na América do Norte, Europa, Austrália e Leste Asiático, eles podem não responder adequadamente quando aplicados a ambientes não agrícolas, como florestas, desertos e sistemas ripários, pois a natureza heterogênea da vegetação, terreno, solos e disponibilidade de água tornam a energia à superfície e os processos aerodinâmicos altamente variáveis e mal definidos (Allen et al., 2011; Gokmen et al., 2012; Barraza et al., 2017; Chen e Liu, 2020; Costa-Filho et al., 2021). O tipo de vegetação e a umidade do local são fatores que podem limitar muito a precisão da estimativa de ET. Foi observado que áreas de pastagem e agrícolas e regiões de clima úmido e subúmido têm estimativas mais precisas da ET por diferentes produtos globais. Enquanto em áreas de florestas, matagais e savanas, e de clima árido e semiárido, demonstram ter uma maior lacuna na precisão da estimativa da ET (Tang et al., 2024), com uma tendência de superestimação em locais com limitação de água (Gokmen et al., 2012; Paul et al., 2014; Trebs et al., 2021). Essa dificuldade se reflete nas estimativas para a Caatinga, que é a maior Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS) contínua das Américas (Moro et al., 2015; Paloschi et al., 2020). Nas FTSS há uma grande variação espaço-temporal na densidade, forma e ramificação da vegetação e disponibilidade de água no solo. A ET no semiárido brasileiro é uma variável que reflete as especificidades da Caatinga.

Em bacias hidrográficas de regiões áridas e semiáridas, monitorar as alterações na ET e compreender os diversos fatores que influenciam seu padrão espacial e temporal é de grande importância. Não somente pelo fato da ET ser uma componente primordial para compreender a dinâmica hídrica e climática nessas áreas, mas por sua quantificação proporcionar meios para extração de informações relevantes (Silans e Silva, 2007; Silans et al., 2008; Silva, 2020; e Costa et al., 2021). Dados como as mudanças na estrutura florestal, no escoamento de água, na fotossíntese e na redução de nutrientes no solo, são componentes que afetam diretamente a ET, a qual pode ser um indicador desses fatores (Ellison et al., 2017; Komatsu & Kume, 2020). Além disso, a ET afeta o escoamento das bacias florestadas que por sua vez afeta a disponibilidade hídrica para consumo humano (Sun et al., 2017; Komatsu & Kume, 2020). Portanto, uma quantificação adequada da ET pode contribuir para políticas de gestão de recursos hídricos e conservação ambiental na Caatinga.

Há um alto número de estudos que aplicaram os modelos SEB em diferentes regiões do mundo (Mohan et al., 2020). Sendo os modelos de fonte única mais comumente encontrados na literatura o *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998), *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI) (Roerink et al., 2000), *Surface Energy Balance System* (SEBS) (Su, 2002), *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internal Calibration* (METRIC; Allen et al., 2007), *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) (Senay et al., 2013). Bezerra et al. (2023) desenvolveram o *Seasonal Tropical Ecosystem Energy Partitioning* (STEPP), um modelo SEB que utiliza dados de SR voltado para estimar a ET em FTSS. O STEPP foi avaliado através de testes robustos e da observação pontual em 4 torres de fluxo na caatinga, com mais de 1000 observações. Os resultados apresentaram boa concordância com os dados observados quando comparados a outros produtos como o SEBAL, MOD16 e PMLv2. Contudo, sua avaliação não contemplou o comportamento espacial e temporal do modelo em diferentes coberturas de solo e condições climáticas. O STEPP foi proposto para incorporar características específicas dessas florestas, como fases fenológicas contrastantes e disponibilidade de água no solo, através do Plant Area Index (PAI) e da umidade do solo por SR, respectivamente. Pelo fato do STEPP ter o cálculo

de rah e dT mais robusto para a representação das FTSS, acredita-se que este modelo pode representar melhor os padrões espaciais e temporais da ET na Caatinga frente a outros modelos SEB.

As séries temporais de ET são uma importante contribuição para estudos regionais e de larga escala sobre balanços hídricos e energéticos, em especial em áreas com escassez de dados, como é o caso da Caatinga (Cunha et al., 2020a; Jaafar e Ahmad, 2020; Laipelt et al., 2021; Saboori et al., 2022). Entretanto, há um alto custo computacional associado ao processamento de longas séries temporais de ET por SR (Cunha et al., 2020b), especialmente em grandes áreas como bacias hidrográficas. Dessa forma, testar algoritmos com diferentes complexidades físicas do modelo e necessidade de dados para sua execução pode

ajudar aos usuários a perceber as potencialidades e limitações associadas a cada método. Diante do apresentado, esse estudo se propõe a analisar o comportamento das séries temporais de evapotranspiração estimada por diferentes modelos SEB: 1) Em escala espacial ao analisar a coerência do comportamento dos modelos em função da variação do uso e cobertura do solo na Caatinga; 2) Em escala temporal ao relacionar o comportamento dos modelos em função das condições climáticas com o uso de anos com regime pluviométrico médio anual contrastante, representados pelos anos de 2012 (seco) e 2020 (chuvoso). Para tanto, o aplicativo ET Caatinga – Time Series Inspector desenvolvido no *Google Earth Engine* (GEE) foi utilizado para estimar a ET através dos modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI.

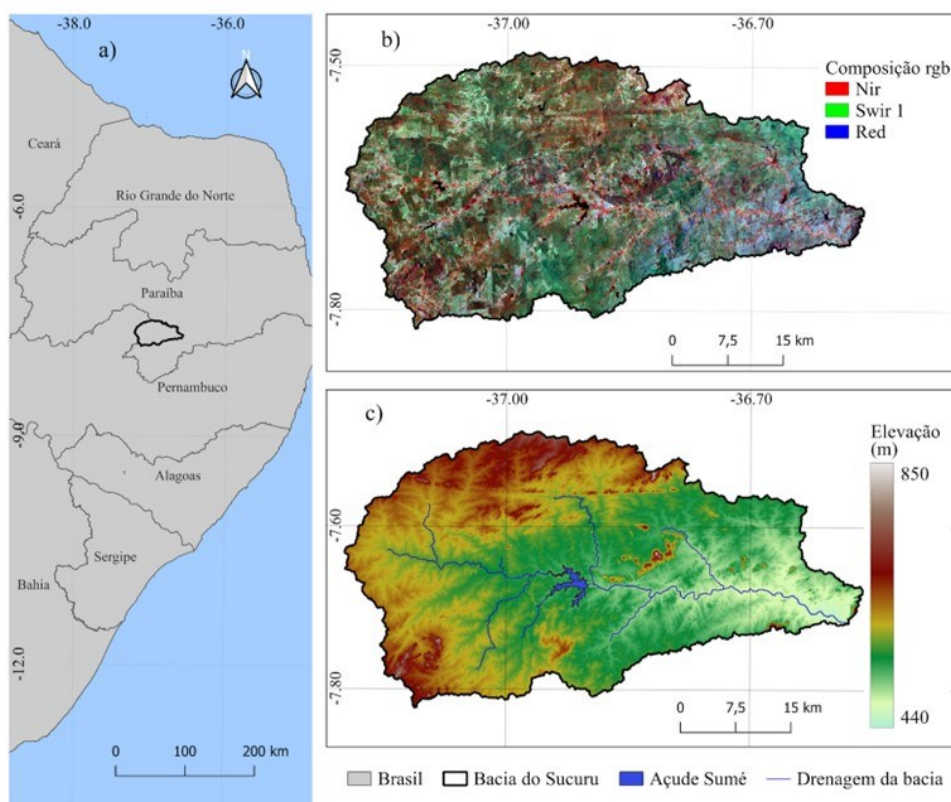


Figura 1. Localização da bacia do Rio Sucuru. a) Situação geográfica da bacia frente ao estado da Paraíba; b) Composição colorida (Bandas: NIR, SWIR 1 e RED) do Satélite Sentinel-2 MSI Harmonizado adquirido via *Google Earth Engine* e c) Mapa de elevação via dados FABDEM com rede de drenagem principal.

Material e métodos

Área de Estudo

A área de estudo é a bacia do Rio Sucuru (BRS), situada no estado da Paraíba (Figura 1). A mesma foi escolhida por estar em uma área

conhecida como Cariris Velhos, região de grande representatividade para o semiárido/Caatinga brasileiro em questão de clima, solo, geologia,

vegetação e topografia (Cadier, 1996; Nouvelot, 1974; Padilha et al., 2016, Cunha et al., 2020a). A bacia está localizada na Mesorregião da Borborema e na Microrregião Homogênea do Cariri Ocidental. Sua área territorial é de 1.652,5 km², representando uma parcela significativa da bacia do Alto Rio Paraíba (Santos et al., 2020b).

O clima predominante na região é classificado como Bsh (semiárido quente) de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). Além disso, o índice de aridez de Thornthwaite para a região é de 0,22, o que também a caracteriza como semiárido. Apresenta duas estações distintas: quente e seca (de junho a janeiro) e chuvosa muito quente (de fevereiro a maio), com precipitação média anual de aproximadamente 596 mm e temperatura média anual de 24°C (Cunha et al., 2020a). A Caatinga hiperxerófila é predominante na BRS, caracterizada pelo porte arbóreo baixo ou arbustivo (Sousa, 2023).

Seleção dos anos seco e chuvoso e pontos para análise da Evapotranspiração

A avaliação da ET na BRS foi conduzida em anos com condições pluviométricas contrastantes. Essa escolha permite analisar a resposta da ET após longo período de escassez hídrica, proporcionando *insights* sobre a resiliência e adaptação da bacia frente a variações extremas no regime de precipitações. A escolha dos anos foi

respaldada por Farias e Xavier (2023), os quais observaram a ocorrência de um evento de seca extrema entre os anos de 2012–2019, com 2012 sendo o ano de mais grave e significativo em termos de escassez hídrica. Neste ano, os índices pluviométricos foram notoriamente inferiores às médias históricas, com muitas áreas recebendo menos de 50% da precipitação média durante a estação chuvosa. Em contraste com essa sequência de anos secos, em 2020 houve precipitações acima da média, encerrando a seca na região. Assim, os anos selecionados para esta investigação foram 2012 e 2020.

Dentro dos limites da BRS, foram selecionados dez pontos, sendo cinco para cada tipo de cobertura, a fim de analisar as séries temporais de ET nos anos escolhidos. A escolha dos pontos foi baseada no tipo de cobertura do solo, para tanto foi utilizado o MapBiomas (Coleção 7), conforme apresentado na Figura 2. A escolha dos pontos foi fundamentada nas coberturas do solo que apresentaram maior percentual de área na bacia, sendo Caatinga floresta com ~68% e pastagem com ~30%. Além disso, para selecionar os pontos, foram estabelecidos os critérios de não haver alteração de cobertura do solo entre os anos de 2012-2020, e que eles estivessem dentro de uma área homogênea de aproximadamente 500 metros, em virtude da resolução espacial dos modelos de ET abordados no estudo.

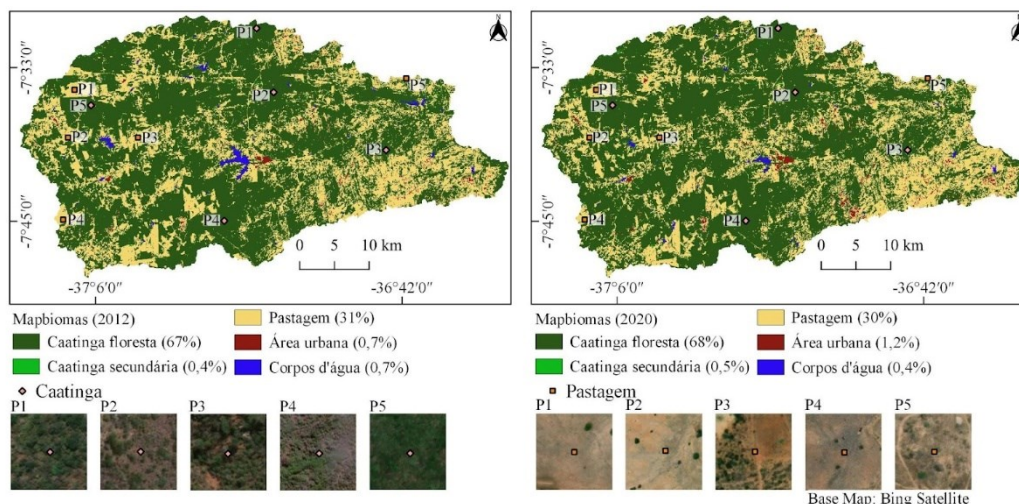


Figura 2. Classificação do uso do solo via Mapbiomas (Coleção 7) para os anos de 2012 (seco) à esquerda e 2020 (chuvoso) à direita.

Modelos SEB usados para estimativa da evapotranspiração

Para a estimativa da ET na BRS, utilizou-se três modelos SEB. Cada modelo apresenta

diferentes níveis de complexidades físicas, indo de modelos mais simples até os mais robustos, sendo eles: S-SEBI (Roerink et al., 2000); SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) e STEEP (Bezerra et al.,

2023). A inclusão do S-SEBI e do SEBAL se fez em virtude de diversas aplicações dos modelos realizados na Caatinga, como os estudos de Santos e Silva (2010), Santos et al. (2014), Borges et al. (2021) que aplicaram o S-SEBI; e Teixeira et al. (2009), Santos et al. (2020a), Costa et al. (2021), e Lima et al. (2021), que utilizaram o SEBAL. O STEEP, por sua vez, é um modelo SEB originalmente desenvolvido para as FTSS, tendo suas estimativas avaliadas para distintos locais da Caatinga (Bezerra et al., 2023). Os modelos foram implementados no ambiente de computação em nuvem, sendo utilizado o GEE, que além de proporcionar alto poder computacional, os dados necessários para aplicação dos modelos estão disponíveis gratuitamente. No presente estudo, os modelos fizeram uso de dados de SR provenientes de produtos dos sensores MODIS. Para obter o albedo de superfície e os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e ajustado ao solo (SAVI), foi utilizado o produto de reflectância de superfície MCD43A4. Este produto combina dados de reflectância dos sensores MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA, minimizando perdas pela presença de nuvens ou o mau funcionamento instrumental (Schaaf & Wang, 2015). A obtenção dos dados de temperatura de superfície (Ts) foi realizada com o produto MOD11A1 e, para preencher dados faltantes, aplicou-se um filtro com o valor médio para uma janela mensal, utilizando uma metodologia semelhante à do MOD16 e ao método proposto por Zhao et al. (2005). Dados de elevação foram obtidos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), enquanto a altura da

vegetação foi extraída do produto *Global Forest Canopy Height* (Potapov et al., 2021). Os dados climáticos necessários para executar os modelos, como velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa, radiação de ondas curtas e radiação térmica líquida na superfície, foram obtidos do produto de reanálise ERA5-Land (Sabater, 2019). O STEEP usa dados de umidade do solo e, para isso, utilizou-se o produto *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) (Rodell et al., 2004). O STEEP e SEBAL realizam o balanço de energia no momento da passagem do satélite (instantâneo) para obter o fluxo de calor latente (λET) como resíduo do balanço de energia à superfície. A partir do λET é possível obter a Fração Evapotranspirativa (FE) instantânea (Ver Tabela 1). O S-SEBI, por sua vez, obtém diretamente a FE instantânea através dos valores de temperatura de superfície identificados nos *pixels* de membros finais. A estimativa da ET diária (mm/dia) nos modelos foi obtida seguindo a proposta de Bastiaanssen (2000) que considera que a FE instantânea é igual a FE diária, conforme Equação 1.

$$ET_{24hrs} = \frac{86400}{(2,501 - 0,00236 \times T_a) \times 10^6} \times FE_{24hrs} \quad (1)$$

onde T_a é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$), e Rn_{24h} corresponde ao saldo de radiação diário (W/m^2); neste estudo essas variáveis foram obtidas com dados do produto ERA5-Land. A FE_{24h} (adimensional) é a Fração Evapotranspirativa obtida conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Obtenção da Fração Evapotranspirativa nos modelos estudados.

Acrônimo do modelo	Nome do modelo	Referências principais	Equação para obter FE_{24h}
STEPP	<i>Seasonal Tropical Ecosystem Energy Partitioning</i>	Bezerra et al. (2023)	$FE_{inst} = \frac{\lambda ET}{Rn - G} = FE_{24h}$
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>	Bastiaanssen et al. (2002); Laipelt et al. (2021)	
S-SEBI	<i>Simplified Surface Energy Balance Index</i>	Roerink et al. (2000); Borges et al. (2021)	$FE_{inst} = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_c} = FE_{24h}$

onde λET é o fluxo de calor latente obtido subtraindo os fluxos de calor do solo (G) e calor sensível (H) do saldo de radiação (Rn). Todas as variáveis são expressas em unidades de energia (W/m^2). T_H (K) é a temperatura do *pixel* quente; T_C (K) é a temperatura do *pixel* frio; T_S (K) é a temperatura de superfície em cada *pixel*.

Todos os modelos utilizados neste estudo seguem a abordagem da identificação de áreas com condições extremas contrastantes em termos de cobertura e umidade proposta por Bastiaanssen et

al. (1998), seja para obter a FE no caso do S-SEBI, ou para se obter o fluxo de calor sensível no SEBAL e STEEP. De acordo com essa metodologia, superfícies de solo seco e irrigado

representam os extremos seco (*pixel* quente) e úmido (*pixel* frio), respectivamente, também chamados de *pixels* de membros finais ou *pixels* âncoras. A escolha dos *pixels* de membros finais foi originalmente conduzida de forma manual, ou seja, procuravam-se os *pixels* quente e frio observando em cada imagem regiões com as características recomendadas. Por ser um processo minucioso deve ser feito por operadores/usuários treinados, pois o resultado é sensível aos *pixels* selecionados. Por isso, estudos como Bhattarai et al. (2017), Silva et al. (2019), Laipelt et al. (2021), vêm sendo desenvolvidos utilizando a seleção automática de candidatos a membros finais com base nas propriedades biofísicas, como índices de

vegetação, albedo de superfície e cobertura do solo. Assim, a seleção não fica sujeita à intervenção do usuário. A abordagem para seleção automática de candidatos a membros finais segue a descrita em Bezerra et al. (2023), utilizando as variáveis biofísicas NDVI, albedo de superfície e T_s para a seleção (Tabela 2). Vale salientar que o procedimento para encontrar os *pixels* de membros finais foi realizado na escala diária, desde que os dados MODIS estivessem disponíveis. Para encontrar os *pixels* de membros finais utilizou-se áreas de interesse (AOI) de 1000 x 1000 km conforme indicado em Cheng et al. (2021) e Bezerra et al. (2023), centradas em cada um dos 10 pontos previamente selecionados na BRS.

Tabela 2. Metodologia utilizada para a seleção dos candidatos a membros finais.

Membros finais		
Etapas	<i>Pixel</i> quente/seco	<i>Pixel</i> frio/úmido
Etapas 1	$Q50\% < \text{albedo de superfície} < Q75\%$ e $0,10 < \text{NDVI} < Q15\%$	$Q25\% < \text{albedo de superfície} < Q50\%$ e $\text{NDVI} > Q97\%$
Etapas 2	dos <i>pixels</i> da Etapa 1, selecionar os <i>pixels</i> com $Q85\% < T_s < Q97\%$	dos <i>pixels</i> da Etapa 1, selecionar os <i>pixels</i> com $T_s < Q20\%$
Etapas 3	Do conjunto de <i>pixels</i> que atenderam as etapas anteriores, foram calculados os valores medianos de R_n , G e T_s para estabelecer um valor único para cada variável e descrever as características dos membros finais	

Q = quantil.

Embora o núcleo dos algoritmos STEEP e SEBAL sejam baseados em encontrar o λET como o resíduo do balanço de energia, no entanto, eles diferem quanto à abordagem utilizada para calcular o H . Bezerra et al. (2023), ao formularem o STEEP, calcularam H usando a rah e dT , ambos tradicionalmente aplicados em modelos SEB, mas também dando ênfase em características das FTSS. A rah foi descrita de acordo com Verhoef et al. (1997a) e Paul et al. (2013), que requer, entre outros parâmetros/variáveis, o comprimento de rugosidade do momentum ($z0m$), a altura de deslocamento plano zero ($d0$) o parâmetro adimensional kB^{-1} e as correções de estabilidade atmosférica de Monin-Obukhov (Paulson, 1970). $z0m$ é influenciado por uma série de propriedades estruturais da planta, por exemplo, altura da vegetação, largura e coeficientes de arrasto da vegetação e espaçamento (ou densidade). $z0m$ é comumente calculado em função do Leaf Area Index (LAI) (Verhoef et al., 1997b; Liu et al., 2021). No entanto, a maioria das plantas das FTSS passa uma parte substancial do ano sem folhas; sob essas condições, $z0m$ é derivado de troncos, caules e galhos. Como o LAI está relacionado apenas à quantidade e variabilidade de folhas, ele não pode

representar a estrutura lenhosa sem folhas (Miranda et al., 2020). Foi por esta razão que o PAI, que é a área total da planta acima do solo, ou seja, folhas e estruturas lenhosas que interceptam ativamente a luz, foi usado para representar as estruturas das plantas no cálculo de $z0m$ e $d0$. Para incorporar as condições de variabilidade hídrica no sistema florestal no cálculo do fluxo de calor sensível, foi aplicado o procedimento descrito em Gokmen et al. (2012) que corrige a equação kB^{-1} apresentada em Su et al. (2001), incorporando a umidade do solo obtida por sensoriamento remoto. Os perfis de condutância do dossel são a ligação entre a umidade do solo e o fluxo de calor sensível/latente. A fonte de calor sensível/latente se move verticalmente ao longo do dossel em função do estresse hídrico da planta (Gokmen et al., 2012; Bonan et al., 2021), o que afeta o comprimento da rugosidade de calor e, portanto, kB^{-1} e rah . Assim, quando há redução da umidade do solo, ocorre também redução do valor de rah e, consequentemente, aumento de H e diminuição de λET . Além disso, para o cálculo do dT , utilizou-se a regressão linear da T_s , com a suposição de extremo contraste em termos de cobertura e umidade (extremos quentes/secos e frios/úmidos)

para determinar os coeficientes de regressão linear. No entanto, nos pixels dos membros finais quentes/secos e frios/úmidos, H foi calculado pelo balanço de energia à superfície (Allen et al., 2007), e o λET remanescente foi incorporado através da equação de Priestley-Taylor (1972) seguindo a abordagem descrita em Singh e Irmak (2011) e French et al. (2015). Para mais detalhes sobre a formulação do STEEP, consultar Bezerra et al. (2023), que descrevem todas as equações utilizadas para o cálculo de H .

Extração de séries temporais de evapotranspiração

A plataforma do GEE possibilita o processamento em larga escala de informações geoespaciais, a partir da computação de alto desempenho em nuvem (Gorelick et al., 2017; Miettinen et al., 2019). Além disso, o GEE possibilita que usuários compartilhem seus códigos através de aplicativos. Os aplicativos (app) do Earth Engine são interfaces dinâmicas de determinada análise para uso de especialistas e não especialistas. Os aplicativos publicados no GEE podem ser acessados a partir de uma URL específica do aplicativo gerado no momento da publicação, e vale mencionar que nenhuma conta do *Earth Engine* é necessária para visualizar ou interagir com um aplicativo publicado.

O app ET Caatinga – Time Series Inspector desenvolvido por Bezerra e Cunha (2023) foi utilizado neste estudo para facilitar as estimativas de ET dentro dos limites da Caatinga. Com ele é possível obter séries temporais de ET em um ano e local selecionado através da coordenada. O app permite que o usuário faça o download da série temporal do pixel de ET escolhido em formato csv, além do raster da ET acumulada anual. O app pode ser executado no período no qual os dados MODIS estão disponíveis (~2004– atual), e é possível escolher um dos modelos implementados no app para a estimativa de ET, que na atual versão é constituído pelo SEBAL, S-SEBI e STEEP (Bezerra e Cunha, 2023). O ET Caatinga – Time Series Inspector pode ser encontrado através da URL:

<https://ulissesalencar17.users.earthengine.app/view/appetmodels>

Com o uso da ferramenta ET Caatinga – Time Series Inspector foram obtidos as imagens da ET acumulada anual para a região da BRS, e extraídas as séries temporais de ET diária modelada por STEEP, SEBAL e S-SEBI nas coordenadas dos pontos de Caatinga e pastagem

escolhidos nos anos de 2012 e 2020. Para se observar o comportamento da precipitação nos pontos selecionados durante os anos de análise, utilizou-se o produto CHIRPS (Funk et al., 2015) adquirido via a plataforma do GEE. A avaliação das estimativas de ET entre os modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI foi realizada com base nos índices estatísticos, média, mínimo, máximo e desvio padrão. Estas análises foram realizadas em Python no ambiente de programação Jupyter com auxílio da biblioteca Pandas para processar as tabelas de dados e os dados estatísticos, e a biblioteca matplotlib para gerar os gráficos.

Com o intuito de verificar o comportamento dos modelos ao longo do tempo, utilizou-se os dados de ET em médias semanais, pois mesmo com a utilização do produto MODIS, que possui grande abrangência temporal, o mesmo ainda apresenta falhas em sua completude de dados diários. Dessa forma, os dados de precipitação também foram acumulados para a escala de 7 dias. Para elaboração dos mapas de ET acumulada anual na BRS foi utilizado o software QGIS versão 3.28.6. Além disso, para demonstrar a sensibilidade dos modelos de ET avaliados neste estudo, aos diversos usos e cobertura do solo, foram traçados perfis dos valores de ET e de NDVI para os anos de 2012 e 2020. Para a elaboração dos perfis utilizou-se o plug-in Profile Tool versão 4.2.6, disponível no QGIS. A linha de perfil traçada sobre a BRS, teve como critério perpassar alguns pontos de interesse para análise, como regiões de Caatinga, pastagem, área urbana e o açude de Sumé. Estes pontos foram definidos pois possuem características que induzem um comportamento específico da ET, o qual espera-se que os modelos consigam representar.

Resultados e discussão

Na Figura 3 é apresentada a série temporal da ET nos modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI em cada um dos pontos selecionados de pastagem e Caatinga nos anos seco e chuvoso. Ao observar os pontos de pastagem durante o ano seco, constata-se que nos três modelos, a ET apresentou baixa variabilidade, com valores médios não superiores a 2 mm/dia. Conforme evidenciado na Tabela 3, a ET na cobertura de pastagem no ano de 2012 variou de 0,11 a 1,20 mm/dia, com média de 0,63 mm/dia no STEEP, 0,08 a 1,67 mm/dia, com média de 0,87 mm/dia no SEBAL, e 0,39 a 1,92 mm/dia, com média de 0,91 mm/dia no S-SEBI. O STEEP foi o modelo em que a ET se manteve mais constante

durante o ano, como evidenciado por seu desvio padrão 0,27 mm/dia (Tabela 3). O SEBAL, por sua

vez, foi o modelo que apresentou maior desvio padrão com 0,34 mm/dia (Tabela 3)

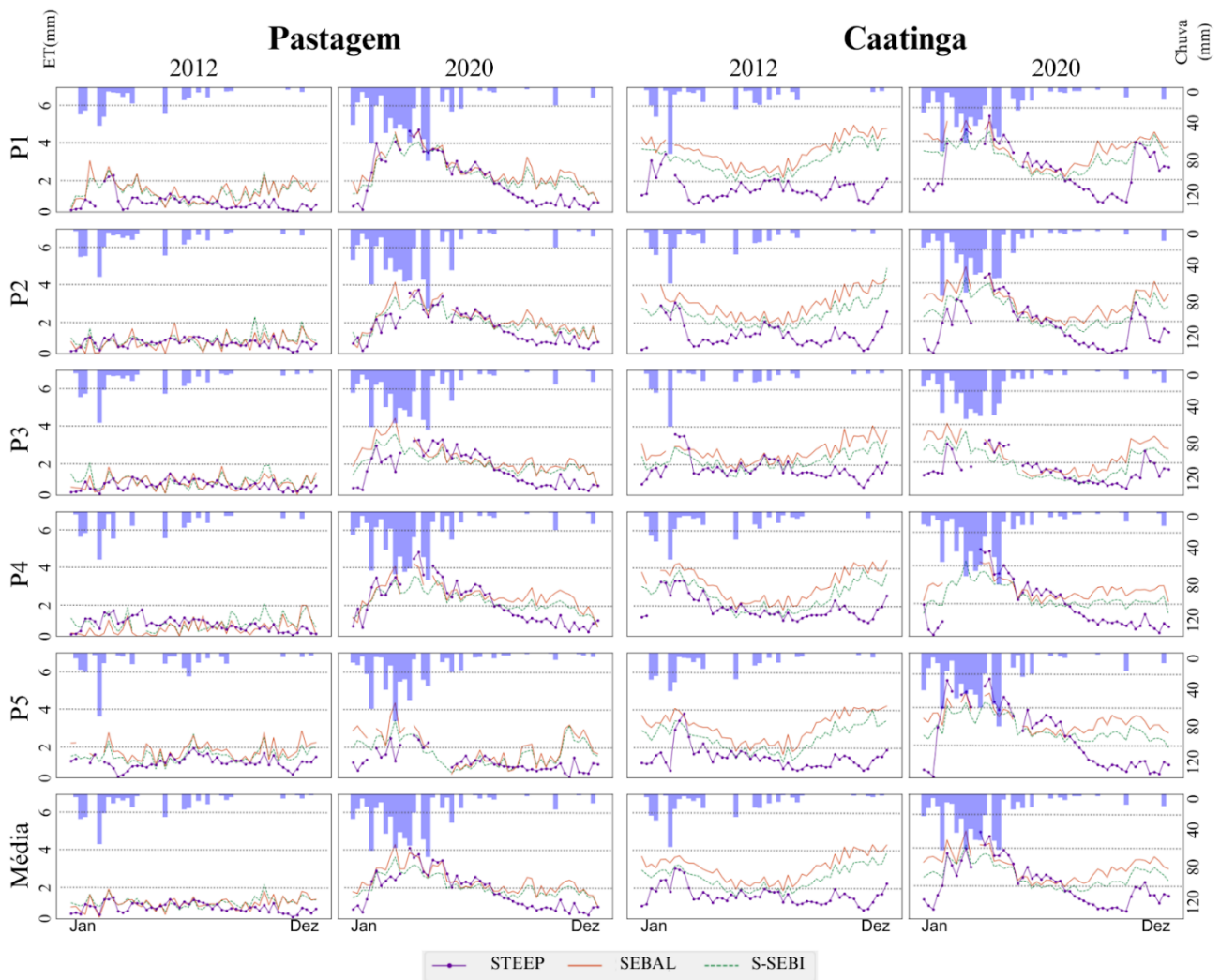


Figura 3. Série temporal semanal de precipitação e evapotranspiração dos modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI para as coberturas Caatinga e pastagem nos anos seco e chuvoso.

Em relação ao ano chuvoso, nos pontos de pastagem, o comportamento da ET entre os modelos seguiu padrão semelhante, obtendo maiores valores de ET após os picos de chuva, e decaindo nos demais meses. A ET nesse ano variou de 0,22 a 3,98 mm/dia, com média de 1,59 mm/dia no STEEP, 0,70 a 4,18 mm/dia, com média de 2,13 mm/dia no SEBAL, e 0,69 a 3,46 mm/dia, com média de 1,85 mm/dia no S-SEBI (Tabela 3). Ao observar os modelos, na área de pastagem ao longo

dos dois anos analisados, o STEEP é o que apresenta a maior dinâmica sazonal, com destaque para o período de estiagem, compreendido entre os meses de agosto a dezembro, que apresenta valores baixos de ET e aproximadamente constantes nesse período. Apesar disso, as diferenças entre os modelos para a representação da pastagem foram suaves, não apresentando grandes contrastes entre seus comportamentos.

Tabela 3. Estatísticas descritivas de evapotranspiração dos modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI para as coberturas Caatinga e pastagem nos anos seco e chuvoso.

Uso do solo	Modelo	Ano: Seco (2012) Chuvoso (2020)			
		Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Caatinga	STEEP	0,48 0,42	1,32 2,00	2,83 4,88	0,51 1,19
	SEBAL	1,58 1,78	2,86 2,93	4,16 4,93	0,72 0,74
	S-SEBI	1,22 1,47	2,28 2,44	3,71 4,15	0,63 0,65
Pastagem	STEEP	0,11 0,22	0,63 1,59	1,20 3,98	0,27 1,02
	SEBAL	0,08 0,70	0,87 2,13	1,67 4,18	0,34 0,74
	S-SEBI	0,39 0,69	0,91 1,85	1,92 3,46	0,28 0,60

As diferenças encontradas entre os modelos podem ser explicadas em virtude da vegetação da Caatinga possuir espécies xerófitas e/ou caducifólias, que têm um mecanismo de resiliência típico. Esse mecanismo atua especialmente na transição da estação chuvosa para a seca (intra-anual). Nesse período, quando a umidade do solo atinge seus níveis mais baixos, a vegetação da Caatinga entra em estado de dormência. Esse estado é marcado pela queda das folhas e uma redução drástica da atividade fotossintética (e, portanto, da transpiração) como estratégia para lidar com a falta da umidade disponível do solo (Dombroski et al., 2011; Paloschi et al., 2020; Bezerra et al., 2023). Isso explica o motivo pelo qual a ET, tanto no ano seco (2012) quanto na estação seca (agosto a dezembro), deve apresentar baixas taxas evapotranspirativas. Esse comportamento é evidenciado nas séries temporais de ET no STEEP, e este desempenho pode ser explicado porque a umidade do solo está incorporada no seu algoritmo. Por outro lado, modelos SEB como o SEBAL e S-SEBI, formulados para depender principalmente da disponibilidade de energia e sem considerar a disponibilidade de água do solo e das plantas, podem não representar satisfatoriamente a ET na vegetação da Caatinga (Gokmen et al., 2012; Paul et al., 2014; Zhu et al., 2022; Bezerra et al., 2023).

Os resultados da linha traçada do perfil de ET e do NDVI ao longo de diferentes usos do solo nos anos de 2012 e 2020 na BRS são apresentados na Figura 4. Os três modelos aplicados neste estudo

demonstram ser eficazes para capturar as variações de ET entre os distintos usos na bacia. Destacam-se valores elevados de ET na região do açude, em contraste com valores mais baixos observados na cidade de Sumé. É notável as diferenças acentuadas quando se observa a transição entre Caatinga e pastagem. Predominantemente, a Caatinga se manteve com taxas de ET superiores às observadas na pastagem. Esse comportamento também foi observado em Silva et al. (2019) e Khoshnood et al. (2023). Apesar da concordância geral nos padrões de ET ao longo das distintas coberturas, a classe de Caatinga nos modelos SEBAL e S-SEBI, durante o ano de 2012, exibiu taxas de ET próximas às registradas no ano de 2020. Isso contraria a esperada sazonalidade interanual acentuada desse bioma (Campos et al., 2019). No entanto, esse comportamento é observado ao se analisar os perfis de ET no STEEP com o NDVI, indicando que as respostas da vegetação e de ET entre os anos seco e chuvoso são mais pronunciadas.

O contraste observado na capacidade de representação dos modelos SEB nos ambientes de Caatinga e pastagem pode ser atribuído às formulações físicas distintas de cada modelo. O SEBAL, na seleção de membros finais, assume que H e dT no membro final frio/úmido e λET no membro final quente/seco são irrelevantes (Bastiaanssen et al., 1998). O membro final frio/úmido refere-se a uma área com uma superfície úmida ou totalmente coberta por vegetação. Assim, em pontos da caatinga durante períodos secos, quando a vegetação reduz sua

atividade fotossintética e ET, uma parcela significativa de H é negligenciada. Da mesma forma, para o membro final quente/seco, em uma área dominada por solo descoberto pode haver um λ ET remanescente resultante de eventos de chuva antecedentes. O S-SEBI apresenta ainda mais simplificações ao calcular a fração evaporativa a partir da temperatura de superfície nos membros

finais. Bezerra et al. (2023) consideraram a λ ET remanescente nos pixels de membros finais por meio da equação de Priestley-Taylor, que visa calibrar os pixels âncora de acordo com o teor de umidade residual (Priestley & Taylor, 1972). Essa correção minimiza o fluxo de calor negligenciado pelo modelo.

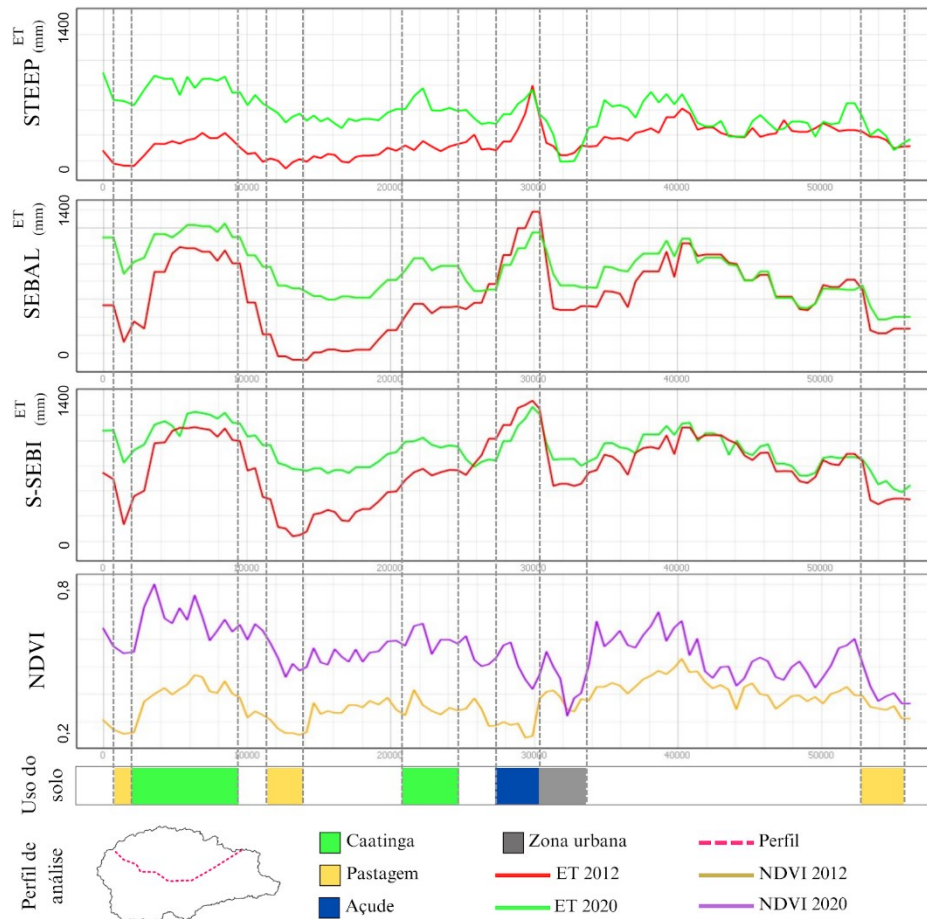


Figura 4. Perfil de comportamento espacial da evapotranspiração no STEEP, SEBAL e S-SEBI e de NDVI em relação a diferentes usos do solo.

Modelos de base física, como os modelos SEB, são altamente influenciados pela representação dos parâmetros de rugosidade (Hu et al., 2021), principalmente em ambientes florestais, que demandam uma representação mais precisa dessa variável. Nas FTSS, como a Caatinga, essa representação da rugosidade torna-se ainda mais crucial devido à sua marcada variação fenológica ao longo do ano (Verhoef et al., 1997b). O S-SEBI não apresenta uma abordagem voltada para a representação da rugosidade, e SEBAL apresenta simplificações no cálculo da resistência

aerodinâmica, como valor único e constante para comprimento de rugosidade de calor e outras variáveis (Bastiaanssen et al., 1998; Bastiaanssen et al., 2005) que podem afetar negativamente nas estimativas de H e λ ET (Paul et al., 2014; Liu et al., 2021). O modelo STEEP ao incorporar o PAI, um índice que tem maior capacidade de representar as alterações fenológicas inter/intra-anuais na Caatinga (Miranda et al., 2020), nas equações de rugosidade, possibilita que esses processos sejam fisicamente melhor representados, em vez da introdução de parâmetros empíricos adicionais.

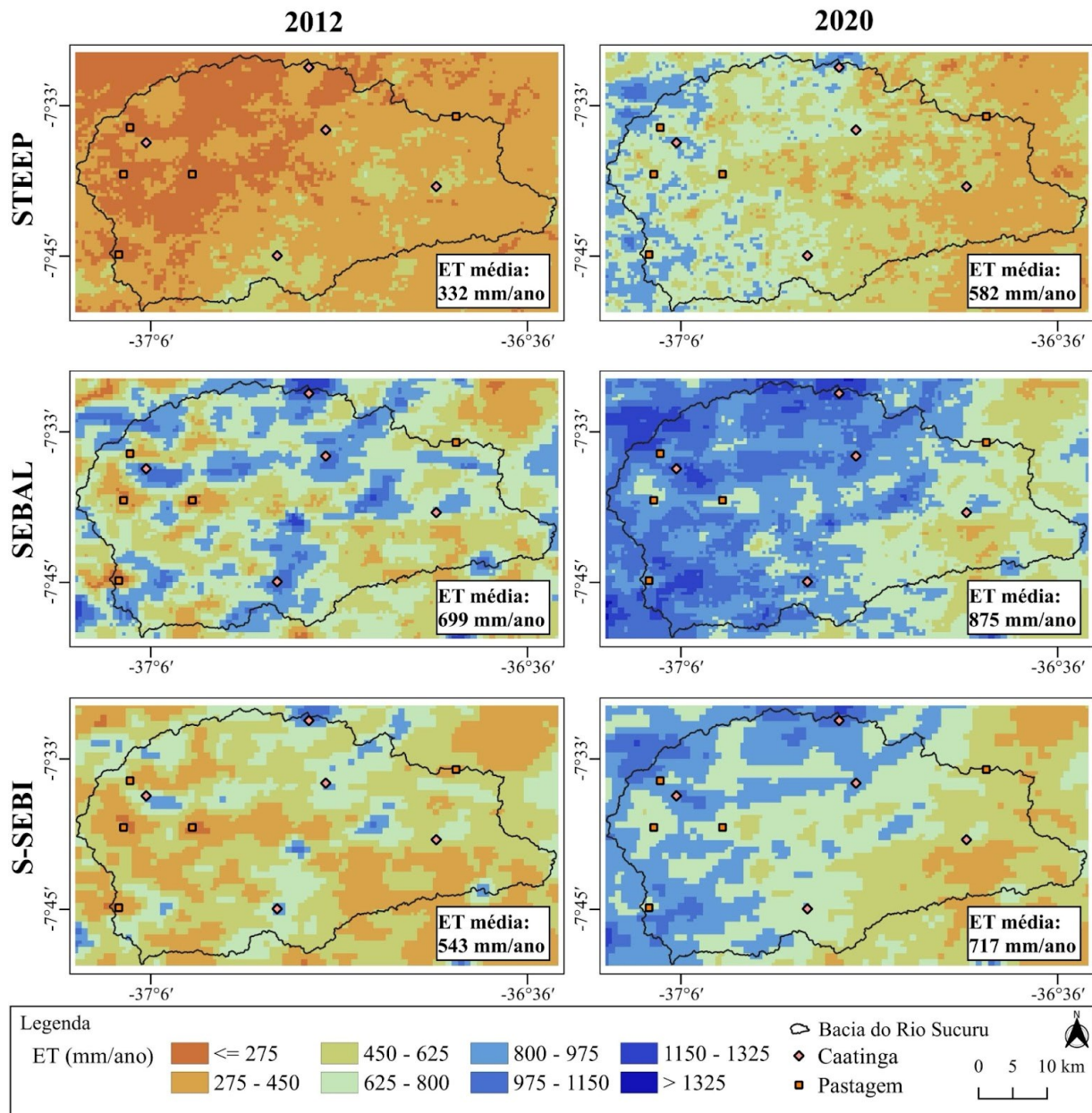


Figura 5. Padrões espaciais da evapotranspiração média anual pelos modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI na Bacia do Rio Sucuru nos anos seco e chuvoso.

A Figura 5 ilustra o padrão espacial da ET anual nos anos de 2012 e 2020, obtido pelos modelos STEEP, SEBAL e S-SEBI em toda a BRS. A média anual de ET na BRS em 2012 e 2020 pelo STEEP foi de 332 e 582 mm/ano, no SEBAL foi de 669 e 875 mm/ano, e no S-SEBI foi de 546 e 717 mm/ano. Destaca-se que o STEEP apresentou o maior ganho percentual (75%) em termos de ET média anual ao considerar os períodos seco (2012) e chuvoso (2020). Em contraste às estimativas obtidas pela aplicação do modelo SEBAL e S-SEBI, esse ganho foi de 30% e 32% respectivamente. O baixo ganho percentual do SEBAL e S-SEBI entre os anos ocorre pois

normalmente os modelos baseados em SR tem dificuldade em considerar a influência de processos como fenologia da vegetação e eventos extremos (Keenan et al., 2012; Jiang e Ryu, 2016), como a seca que ocorreu na BRS em 2012 (Farias & Xavier, 2023). Isso provocou uma superestimação da ET na bacia como um todo durante o ano de 2012 e o período de estiagem de 2020, aproximando as estimativas de ET de ambos os anos. Essa superestimação em ambientes secos é uma tendência já constatada por outros estudos (Gokmen et al., 2012; Paul et al., 2014; Trebs et al., 2021). O SEBAL foi o modelo que apresentou as maiores superestimativas, especialmente em áreas

da Caatinga. Bezerra et al. (2023) também constataram superestimativas similares em sua análise pontual, com o SEBAL registrando superestimativas superiores a 140%, enquanto a maior superestimativa do STEEP foi de 60% em relação aos dados observados. Apesar disso, em todos os três modelos é possível observar, espacialmente, que a pastagem foi claramente distinguível da Caatinga. Esse resultado pode ser atribuído à observação de que áreas de pastagem ou agrícolas tendem a apresentar um comportamento de ET mais previsível para diversos modelos (Tang et al., 2024).

Conclusões

Os resultados deste estudo destacam a influência significativa das especificidades das condições climáticas e da vegetação no comportamento esperado para as estimativas de ET, particularmente em ecossistemas complexos, como a Caatinga. Ao analisar as séries temporais e os padrões espaciais de ET estimadas por diferentes modelos SEB em coberturas do solo na Caatinga, evidencia-se que a escolha do modelo desempenha um papel crucial na representação desses processos biofísicos.

As estimativas de ET pelo SEBAL e S-SEBI em coberturas de solo como pastagem, área urbana e corpos hídricos assemelhavam-se, espacialmente e temporalmente, às obtidas pelo STEEP por serem coberturas mais homogêneas ou atenderem mais facilmente os critérios de disponibilidade de energia. No entanto, a Caatinga foi a cobertura do solo que apresentou maior discrepância de ET entre os modelos. Espacialmente, o modelo STEEP conseguiu diferenciar a Caatinga dos demais usos e coberturas do solo. Temporalmente, ele foi capaz de representar como a dinâmica sazonal da vegetação influencia a ET em condições climáticas contrastantes, ao incorporar a umidade do solo e a estrutura da planta em seu algoritmo. Por outro lado, as representações espaciais dos modelos SEBAL e S-SEBI, embora consigam diferenciar a Caatinga de outros usos e coberturas do solo, apresentaram superestimativas na ET dessas áreas. Temporalmente, esses modelos não são capazes de capturar a sazonalidade característica dessa vegetação. Isso ocorre porque as simplificações em seus algoritmos não conseguem corresponder às complexidades de uma vegetação heterogênea inserida em um cenário de escassez de água.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pelo uso dos espaços e infraestrutura ofertados no laboratório de hidráulica II. À Google pela disponibilização das imagens de satélite através do acesso gratuito à plataforma *Google Earth Engine*. À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) sob as bolsas 010/2021, 016/2023, ao Observatório Nacional da Dinâmica da Água e do Carbono no Bioma Caatinga (ONDACBC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas aos autores. Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa (bolsa nº 409341/2021–5), e ao PELD Integrado Rio Paraíba (FAPESQ/PELD 23/2020).

Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899-920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339437(2007)133:4(380))
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728
- Anapalli, S. S., Ahuja, L. R., Gowda, P. H., Ma, L., Marek, G., Evett, S. R., & Howell, T. A. (2016). Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. *Agricultural Water Management*, 177, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.009>
- Barraza, V., Restrepo-Coupe, N., Huete, A., Grings, F., Beringer, J., Cleverly, J., & Eamus, D. (2017). Estimation of latent heat flux over savannah vegetation across the North Australian Tropical Transect from multiple sensors and global meteorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 689-703. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.0.013>
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology*,

- 229(1-2), 87-100.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., & Allen, R. G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 85-93.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339437(2005)131:1(85))
- Bastiaanssen, W. G., Ahmad, M. U. D., & Chemin, Y. (2002). Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water resources research*, 38(12), 9-1. <https://doi.org/10.1029/2001WR000386>
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bezerra, U. A. & Cunha, J. (2023). Aplicativo para estimativa de séries temporais de evapotranspiração na caatinga. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Aracaju/SE.
- Bezerra, U. A., Cunha, J., Valente, F., Nóbrega, R. L., Andrade, J. M., Moura, M. S., ... & Galvão, C. O. (2023). STEEP: A remotely-sensed energy balance model for evapotranspiration estimation in seasonally dry tropical forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333, 109408.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109408>
- Bhattarai, N., Quackenbush, L. J., Im, J., & Shaw, S. B. (2017). A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote sensing of environment*, 196, 178-192.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.009>
- Bonan, G. B., Patton, E. G., Finnigan, J. J., Baldocchi, D. D., & Harman, I. N. (2021). Moving beyond the incorrect but useful paradigm: reevaluating big-leaf and multilayer plant canopies to model biosphere-atmosphere fluxes—a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306, 108435.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108435>
- Borges, C. K., Carneiro, R. G., dos Santos, C. A., & dos Santos, C. A. (2021). Obtaining the daily actual evapotranspiration through remote sensing techniques application in Brazilian Semiarid. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing v*, 11(1), 18-31.
- Cadier, É. (1996). Small watershed hydrology in semi-arid north-eastern Brazil: basin typology and transposition of annual runoff data. *Journal of Hydrology*, 182(1-4), 117-141.
- Campos, S., Mendes, K. R., da Silva, L. L., Mutti, P. R., Medeiros, S. S., Amorim, L. B., ... & Bezerra, B. G. (2019). Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 398-412.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.018>
- Chen, J. M., & Liu, J. (2020). Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111594.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111594>
- Cheng, M., Jiao, X., Li, B., Yu, X., Shao, M., & Jin, X. (2021). Long time series of daily evapotranspiration in China based on the SEBAL model and multisource images and validation. *Earth System Science Data*, 13(8), 3995-4017. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3995-2021>
- Chu, H., Luo, X., Ouyang, Z., Chan, W. S., Dengel, S., Biraud, S. C., ... & Zona, D. (2021). Representativeness of Eddy-Covariance flux footprints for areas surrounding AmeriFlux sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301, 108350.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108350>
- Costa, J., Navarro-Hevia, J., Costa, C. A. G., & de Araujo, J. C. (2021). Temporal dynamics of evapotranspiration in semiarid native forests in Brazil and Spain using remote sensing. *Hydrological Processes*, 35(3), e14070. <https://doi.org/10.1002/hyp.14070>
- Costa-Filho, E., Chávez, J. L., Zhang, H., & Andales, A. A. (2021). An optimized surface aerodynamic temperature approach to estimate maize sensible heat flux and evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311, 108683.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108683>
- Cunha, J., Nobrega, R. L., Rufino, I., Erasmi, S., Galvão, C., & Valente, F. (2020a). Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: Evidence from the Brazilian Caatinga. *Remote Sensing of*

- Environment, 238, 111250.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111250>
- Cunha, J., Pereira, T. E., Pereira, E., Rufino, I., Galvão, C., Valente, F., & Brasileiro, F. (2020b). A high-throughput shared service to estimate evapotranspiration using Landsat imagery. *Computers & Geosciences*, 134, 104341.<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104341>
- Danelichen, V. H. D. M., Biudes, M. S., Souza, M. C., Machado, N. G., Silva, B. B. D., & Nogueira, J. D. S. (2014). Estimation of soil heat flux in a neotropical Wetland region using remote sensing techniques. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 469-482. <https://doi.org/10.1590/0102778620120568>
- Dombroski, J. L. D., Praxedes, S. C., de Freitas, R. M. O., & Pontes, F. M. (2011). Water relations of Caatinga trees in the dry season. *South African Journal of Botany*, 77(2), 430-434. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.11.001>
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., ... & Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global environmental change*, 43, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Farias, A. A. D., & Xavier, R. A. (2023). Eventos Extremos de Secas na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Sucuru, Cariri Paraibano. *Revista Brasileira de Meteorologia*. <https://doi.org/10.1590/0102-77863810087>
- Ferreira, T. R., Da Silva, B. B., De Moura, M. S., Verhoef, A., & Nobrega, R. L. (2020). The use of remote sensing for reliable estimation of net radiation and its components: a case study for contrasting land covers in an agricultural hotspot of the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108052.<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108052>
- Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., ... & Wood, E. F. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water resources research*, 53(4), 2618-2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- French, A. N., Hunsaker, D. J., & Thorp, K. R. (2015). Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment*, 158, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.003>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21.
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Verhoef, A., Verhoef, W., Batelaan, O., & van der Tol, C. (2012). Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions. *Remote sensing of environment*, 121, 261-274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.003>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolk, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation science*, 26, 223-237.
- Gu, C., Tang, Q., Zhu, G., Ma, J., Gu, C., Zhang, K., ... & Niu, S. (2021). Discrepant responses between evapotranspiration-and transpiration-based ecosystem water use efficiency to interannual precipitation fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 303, 108385.<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108385>
- Hu, X., Shi, L., Lin, G., & Lin, L. (2021). Comparison of physical-based, data-driven and hybrid modeling approaches for evapotranspiration estimation. *Journal of Hydrology*, 601, 126592. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126592>
- Jaafar, H. H., & Ahmad, F. A. (2020). Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111034. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.033>
- Jiang, C., & Ryu, Y. (2016). Multi-scale evaluation of global gross primary productivity and evapotranspiration products derived from Breathing Earth System Simulator (BESS). *Remote Sensing of Environment*, 186, 528-547.<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.030>

- Keenan, T. F., Baker, I., Barr, A., Ciais, P., Davis, K., Dietze, M., ... & Richardson, A. D. (2012). Terrestrial biosphere model performance for inter-annual variability of land-atmosphere CO₂ exchange. *Global Change Biology*, 18(6), 1971-1987. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02678.x>
- Khoshnood, S., Lotfata, A., Mombeni, M., Daneshi, A., Verrelst, J., & Ghorbani, K. (2023). A spatial and temporal correlation between remotely sensing evapotranspiration with land use and land cover. *Water*, 15(6), 1068. <https://doi.org/10.3390/w15061068>
- Komatsu, H., & Kume, T. (2020). Modeling of evapotranspiration changes with forest management practices: A genealogical review. *Journal of Hydrology*, 585, 124835. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124835>
- Laipelt, L., Kayser, R. H. B., Fleischmann, A. S., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 81-96. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>
- Lima, C. E. S., de Oliveira Costa, V. S., Galvêncio, J. D., da Silva, R. M., & Santos, C. A. G. (2021). Assessment of automated evapotranspiration estimates obtained using the GP-SEBAL algorithm for dry forest vegetation (Caatinga) and agricultural areas in the Brazilian semiarid region. *Agricultural Water Management*, 250, 106863. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106863>
- Liu, Y., Guo, W., Huang, H., Ge, J., & Qiu, B. (2021). Estimating global aerodynamic parameters in 1982–2017 using remote-sensing data and a turbulent transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112428>
- McShane, R. R., Driscoll, K. P., & Sando, R. (2017). A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents. *Scientific Investigations Report*, (2017-5087). <https://doi.org/10.3133/sir20175087>
- Miettinen, J., Shi, C., & Liew, S. C. (2019). Towards automated 10–30 m resolution land cover mapping in insular South-East Asia. *Geocarto International*, 34(4), 443-457. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1408700>
- Miranda, R. de Q., Nóbrega, R. L. B., Moura, M. S. B. de, Raghavan, S., & Galvêncio, J. D. (2020). Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101992. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101992>
- Mohan, M. P., Kanchirapuzha, R., & Varma, M. R. (2020). Review of approaches for the estimation of sensible heat flux in remote sensing-based evapotranspiration models. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(4), 041501-041501. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.041501>
- Moro, M. F., Silva, I. A., Araújo, F. S. D., Nic Lughadha, E., Meagher, T. R., & Martins, F. R. (2015). The role of edaphic environment and climate in structuring phylogenetic pattern in seasonally dry tropical plant communities. *PLoS One*, 10(3), e0119166. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119166>
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote sensing of environment*, 115(8), 1781-1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Nouvelot, J. F. (1974). Planificação da implantação de Bacias Representativas. Aplicação à área da Sudene. SUDENE, Recife.
- Padilha, A. L., Vitorello, Í., Pádua, M. B., & Fuck, R. A. (2016). Deep magnetotelluric signatures of the early Neoproterozoic Cariris Velhos tectonic event within the Transversal sub-province of the Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research*, 275, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.12.012>
- Paloschi, R. A., Ramos, D. M., Ventura, D. J., Souza, R., Souza, E., Morellato, L. P. C., ... & Borma, L. D. S. (2020). Environmental drivers of water use for caatinga woody plant species: combining remote sensing phenology and sap flow measurements. *Remote Sensing*, 13(1), 75. <https://doi.org/10.3390/rs13010075>
- Paul, G., Gowda, P. H., Prasad, P. V., Howell, T. A., Aiken, R. M., & Neale, C. M. (2014). Investigating the influence of roughness length for heat transport (zoh) on the performance of SEBAL in semi-arid irrigated and dryland agricultural systems. *Journal of Hydrology*, 509, 231-

- 244.<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.040>
- Paul, G., Gowda, P. H., Prasad, P. V., Howell, T. A., Staggenborg, S. A., & Neale, C. M. (2013). Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources*, 59, 157-168.<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.06.003>
- Paulson, C. A. (1970). The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology* (1962-1982), 857-861.
- Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., ... & Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/15200493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Projeto MapBiomass – Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 4 set. 2023. através do link: <https://mapbiomas.org/o-projeto>.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., ... & Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society*, 85(3), 381-394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147-157. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8)
- Sabater, J. M. (2019). ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus climate change service (C3S) climate data store (CDS). Eur. Centre Medium-Range Weather Forecasts, Eur. Union, Tech. Rep.
- Saboori, M., Mousivand, Y., Cristóbal, J., Shah-Hosseini, R., & Mokhtari, A. (2022). An automated and improved methodology to retrieve long-time series of evapotranspiration based on remote sensing and reanalysis data. *Remote Sensing*, 14(24), 6253. <https://doi.org/10.3390/rs14246253>
- Salazar-Martínez, D., Holwerda, F., Holmes, T. R., Yépez, E. A., Hain, C. R., Alvarado-Barrientos, S., ... & Vivoni, E. R. (2022). Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration products at low-latitude eddy covariance sites. *Journal of Hydrology*, 610, 127786.<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127786>
- Santos, C. A. C. D., & Silva, B. B. D. (2010). Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 365-374. <https://doi.org/10.1590/S010277862010000300008>
- Santos, C. A., Mariano, D. A., Francisco das Chagas, A., Dantas, F. R. D. C., de Oliveira, G., Silva, M. T., ... & Neale, C. M. (2020a). Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101982. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101982>
- Santos, É. G., dos Santos, C. A. C., Bezerra, B. G., & das Chagas Araújo, F. (2014). Análise de parâmetros ambientais no núcleo de desertificação de Irauçuba-CE usando imagens de satélite. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 07, 915-926.
- Santos, E. I., de Alencar, M. L. S., Schramm, V. B., dos Santos, J. S., & do Nascimento, M. T. C. C. (2020b). Uso de geotecnologias no estudo da degradação das terras da bacia do rio Sucuru, na Paraíba. *Ciência e Natura*, 42, e57-e57.
- Schaaf, C., & Wang, Z. (2015). MCD43A4 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Nadir BRDF Adjusted Ref Daily L3 Global - 500m V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A4.006>
- Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 577-591. <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- Silans, A. M. B. P., & Silva, F. M. (2007). Fluxo de calor sensível e evapotranspiração na Caatinga: Estudo experimental.. *Revista*

- Brasileira de Recursos Hídricos, 12(1), 177–188.
- Silans, A. M. B. P., Werlang, L. M., & Goldfarb, M. C (2008). Desenvolvimento de um Modelo SVATS para a Região Semi-Árida do Cariri Paraibano. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 13, 5-15.
- Silva, A. M., da Silva, R. M., & Santos, C. A. G. (2019). Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 79, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.02.012>
- Silva, G. J. F. D. (2020). Modelagem dos componentes do balanço hídrico e monitoramento da seca em bacia hidrográfica no bioma caatinga. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB. 180f. 2020.
- Singh, R. K., & Irmak, A. (2011). Treatment of anchor pixels in the METRIC model for improved estimation of sensible and latent heat fluxes. Hydrological sciences journal, 56(5), 895-906. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.587424>
- Singh, R. K., & Irmak, A. (2011). Treatment of anchor pixels in the METRIC model for improved estimation of sensible and latent heat fluxes. Hydrological sciences journal, 56(5), 895- 906.<https://doi.org/10.1080/02626667.2011.587424>
- Sousa, J. H. S. D. (2023). Aplicação do algoritmo Random Forest para classificação do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Sucuru utilizando o Google Earth Engine. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal de Campina Grande, Sumé - PB
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and earth system sciences, 6(1), 85-100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Su, Z., Schmugge, T., Kustas, W. P., & Massman, W. J. (2001). An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere. Journal of applied meteorology and climatology, 40(11), 1933-1951. [https://doi.org/10.1175/15200450\(2001\)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200450(2001)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2)
- Sullivan, R. C., Cook, D. R., Ghate, V. P., Kotamarthi, V. R., & Feng, Y. (2019). Improved spatiotemporal representativeness and bias reduction of satellite-based evapotranspiration retrievals via use of in situ meteorology and constrained canopy surface resistance. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 124(2), 342-352. <https://doi.org/10.1029/2018JG004744>
- Sun, X., Onda, Y., Otsuki, K., Kato, H., Gomi, T., & Liu, X. (2017). Change in evapotranspiration partitioning after thinning in a Japanese cypress plantation. Trees, 31, 1411-1421. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1555-1>
- Tang, H., & Li, Z. L. (2014). Quantitative remote sensing in thermal infrared: theory and applications. Springer Science & Business Media.
- Tang, R., & Li, Z. L. (2015). Evaluation of two end-member-based models for regional land surface evapotranspiration estimation from MODIS data. Agricultural and Forest Meteorology, 202, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.005>
- Tang, R., Peng, Z., Liu, M., Li, Z. L., Jiang, Y., Hu, Y., ... & Fisher, J. B. (2024). Spatial-temporal patterns of land surface evapotranspiration from global products. Remote Sensing of Environment, 304, 114066. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114066>
- Teixeira, A. D. C., Bastiaanssen, W. G., Ahmad, M., & Bos, M. G. (2009). Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. Agricultural and forest meteorology, 149(3-4), 462- 476. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>
- Trebs, I., Mallick, K., Bhattarai, N., Sulis, M., Cleverly, J., Woodgate, W., ... & Boulet, G. (2021). The role of aerodynamic resistance in thermal remote sensing-based evapotranspiration models. Remote sensing of environment, 264, 112602. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112602>
- Verhoef, A., De Bruin, H. A. R., & Van Den Hurk, B. J. J. M. (1997a). Some practical notes on the parameter kB– 1 for sparse vegetation. Journal of Applied Meteorology, 36(5), 560-572. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<0560:SPNOTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<0560:SPNOTP>2.0.CO;2)

- Verhoef, A.; McNaughton, K. G. & Jacobs, A. F. G. (1997b). A parameterization of momentum roughness length and displacement height for a wide range of canopy densities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(1), 81–91. <https://doi.org/10.5194/hess-1-81-1997>
- Wang, C., Yang, J., Myint, S. W., Wang, Z. H., & Tong, B. (2016). Empirical modeling and spatio-temporal patterns of urban evapotranspiration for the Phoenix metropolitan area, Arizona. *GIScience & Remote Sensing*, 53(6), 778- 792. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1243399>
- Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. Wiley interdisciplinary reviews: Water, 3(6), 834-853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>
- Zhao, M., Heinsch, F. A., Nemani, R. R., & Running, S. W. (2005). Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote sensing of Environment*, 95(2), 164-176. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.011>
- Zhu, W., Tian, S., Wei, J., Jia, S., & Song, Z. (2022). Multi-scale evaluation of global evapotranspiration products derived from remote sensing images: Accuracy and uncertainty. *Journal of Hydrology*, 611, 127982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127982>