

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **GEESEBAL: UM APLICATIVO PARA ESTIMATIVAS DE SÉRIES TEMPORAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

*Leonardo Laipelt<sup>1</sup> ; Ayan Santos Fleischmann<sup>2</sup> ; Rafael Kayser<sup>3</sup> & Anderson Luis Ruhoff<sup>4</sup>*

**RESUMO** - A estimativa acurada da evapotranspiração (ET) é essencial para diversas aplicações na gestão de recursos hídricos. O uso de modelos de ET que utilizam produtos de sensoriamento remoto vem crescendo nos últimos anos com o desenvolvimento de novas tecnologias como computação em nuvem, deep learning e processamento de alta performance. Esse estudo apresenta o geeSEBAL, uma nova ferramenta para estimativa automática de ET baseado no modelo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e desenvolvido utilizando a plataforma Google Earth Engine (GEE). A estrutura da ferramenta é apresentada, bem como estudos de caso em diferentes condições climáticas do Brasil através da validação da estimativa de ET diária com dados de torres de fluxo *eddy covariance*. As estimativas da ET diária apresentaram uma média de RMSD de 0,67 mm dia<sup>-1</sup>. Por fim, é apresentado diferentes séries temporais de ET (1984-2020) em diferentes áreas do Brasil que possuem histórico de mudanças de uso e cobertura da terra, de áreas desflorestadas na Amazônia a áreas irrigadas nos biomas Cerrado e Pampa. A ferramenta está disponível na plataforma GitHub (<https://github.com/et-brasil/geesebal>) e possui uma versão com interface gráfica do usuário (<https://etbrasil.org/geesebal>), permitindo importantes avanços na gestão de recursos hídricos em relação a mudanças na ET.

**ABSTRACT** – An accurate estimation of evapotranspiration (ET) is essential for many applications in water resources management. ET models using remote sensing products have flourished in recent years with new technologies as cloud computation, deep learning and high performance computing. This study presents geeSEBAL, a new tool for automatic estimation of ET based on the Surface Energy Balance for Land (SEBAL) and developed within the Google Earth Engine (GEE). The tool framework is introduced, and case studies across multiple climate conditions in Brazil are presented by validating daily ET with eddy covariance. Daily ET estimations yielded an average RMSD of 0,67 mm day<sup>-1</sup>. Finally, we assessed the long-term effects (1984-2020) of land cover changes for key areas in Brazil, from deforested areas in Amazon to irrigated crops in the Pampas and Cerrado biomes. geeSEBAL codes are written in Python and JavaScript and are freely available on GitHub (<https://github.com/et-brasil/geesebal>). geeSEBAL also includes a graphical user interface (<https://etbrasil.org/geesebal>), allowing important advances in water resources management at regional scales.

**Palavras-Chave** – Evapotranspiração; Google Earth Engine; SEBAL

1) Mestrando em Recursos Hídricos, IPH/UFRGS, [leolaipelt@gmail.com](mailto:leolaipelt@gmail.com)

2) Doutorando em Recursos Hídricos, IPH/UFRGS, [ayan.flieschmann@gmail.com](mailto:ayan.flieschmann@gmail.com)

3) Doutorando em Recursos Hídricos, IPH/UFRGS, [rafael.hbkayser@gmail.com](mailto:rafael.hbkayser@gmail.com)

4) Prof. Dr. no Departamento de Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, [andersonruhoff@gmail.com](mailto:andersonruhoff@gmail.com)

## INTRODUÇÃO

O conceito de evapotranspiração (ET) está associado ao fenômeno físico da passagem da água em seu estado líquido e sólido para vapor d'água atmosférico, através da evaporação de superfícies líquidas (rios, lagos e oceano), da água presente no solo e da lâmina interceptada pelo dossel, como também da transpiração proveniente da respiração das plantas. O conhecimento da ET e do seu comportamento é fundamental visto a sua direta relação com o ciclo hidrológico, podendo contribuir para o melhor manejo e planejamento do uso da água (Allen et al., 2011; Bastiaanssen et al., 1999; Biggs et al., 2015).

Apesar da importância das estimativas de ET através de metodologias *in situ*, existem limitações enquanto a sua representatividade espacial, sendo representativas apenas a área circundante de medição. Além disso, os equipamentos necessários para a implantação de um sistema de medição do tipo *eddy covariance* (EC), por exemplo, são onerosos para sua aplicação em larga escala, dificultando ainda mais a obtenção de dados em locais remotos. Sendo assim, uma alternativa viável para a estimativa da ET em diferentes escalas espaciais e temporais está no uso de modelos que utilizam produtos de sensoriamento remoto (Fisher et al., 2017; Yang et al., 2012). Os modelos se diferenciam entre aqueles que utilizam índice de vegetação e os de temperatura da superfície (Ts). Os modelos do segundo grupo, ainda, apresentam diferenciações enquanto a sua estrutura. Os que estimam transpiração e evaporação como uma única variável são conhecidos como “fonte-única”, enquanto os que estimam os processos de transpiração e evaporação separadamente para posteriormente somá-los e estimar a ET são conhecidos como “fonte-dupla”. Alguns modelos representantes do primeiro grupo são: *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen, 1995), *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (Allen et al., 2007) e *Simplified Surface Energy Balance Calibration* (SSEBop) (Senay et al., 2013). Já os do segundo grupo: *Two-Source Evapotranspiration Balance* (T-SEB) (Norman et al., 1995) e o *Atmosphere – Land Exchange Inverse* (ALEXI) (Anderson, 1997).

Particularmente, o modelo SEBAL se destaca pela sua variedade de aplicações e diferentes condições climáticas e uso e cobertura do solo (Bhattarai et al., 2012; Laipelt et al., 2020; Ruhoff et al., 2012; Tang et al., 2013; Teixeira et al., 2009). Para a estimativa da ET, o modelo estima o fluxo instantâneo de calor latente (LE) como saldo residual da equação do balanço energético ( $LE = R_n - H - G$ ) em que  $R_n$ ,  $H$  e  $G$  são estimativas instantâneas do saldo de radiação, do fluxo de calor sensível e do fluxo de calor do solo, respectivamente. Para estimar a ET, o SEBAL apresenta uma calibração interna em que é selecionado pixels âncoras (pixel quente e frio) que representarão condições extremas de temperatura e umidade na imagem. O pixel quente representa uma condição em que o  $H$  possui toda a energia para aquele ponto e  $LE$  é igual a zero, significando uma condição de baixa umidade e de altas temperaturas. A condição se inverte para o ponto do pixel frio, considerando  $LE$  como o total de energia disponível e  $H$  igual a zero.

O uso de novas tecnologias têm proporcionado avanços em aplicações envolvendo o gerenciamento de recursos hídricos (Saraiva et al., 2020; Vos et al., 2019). A plataforma de processamento em nuvem Google Earth Engine (GEE) disponibiliza fácil acesso aos principais produtos de sensoriamento remoto, como também ferramentas de geoprocessamento que permitem estudos em diversas áreas da ciência da terra, como no mapeamento de inundações (Alonso et al., 2020; Hird et al., 2017), detecção de superfícies aquáticas (Kiptala et al., 2013; Pekel et al., 2016) e mudanças de uso e cobertura da terra (Kennedy et al., 2018; Parente et al., 2019). Assim, o GEE também possibilita o desenvolvimento de modelos que estimam ET, sendo alguns já acessíveis ao público, como é o caso do SSEBop da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020) e do METRIC a partir da ferramenta EEFlux (Allen et al., 2015).

Dessa forma, o objetivo principal do trabalho consiste em disponibilizar uma ferramenta de código aberto para estimar ET utilizando o modelo SEBAL, desenvolvendo-o integralmente na

plataforma de processamento em nuvem GEE. Além disso, realizou-se validação das estimativas de ET comparando-as com medições de torres abrangidas em diferentes regiões do Brasil. Por fim, foi extraído séries temporais (1984-2020) em quatro diferentes regiões do Brasil com histórico de mudanças de uso e cobertura de solo para demonstrar o potencial da ferramenta e as alterações ocorridas nas taxas de ET nesses locais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

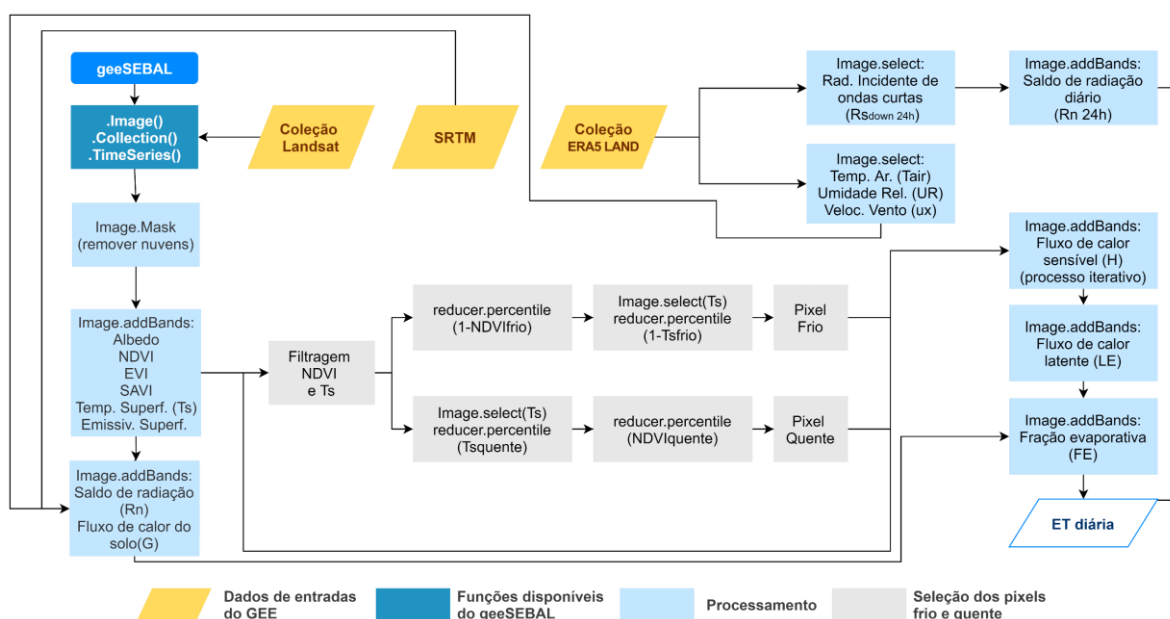
### geeSEBAL

O modelo SEBAL foi estruturado na plataforma GEE, nomeado de geeSEBAL, em linguagem de programação JavaScript e Python (versão 3.6 ou superior). Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8, em suas versões de melhor qualidade (*Tier 1*), apresentando resolução espacial de 30 metros e temporal de 16 dias. As informações meteorológicas horárias e diárias foram obtidas através do produto de reanálise ERA5 Land, de resolução espacial 0,1°. As informações meteorológicas utilizadas foram as estimativas horárias de temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a estimativa diária da radiação incidente.

A metodologia de calibração automática para selecionar os pixels frio e quente é baseado em uma versão simplificada do algoritmo *Calibration using Inverse Modeling at Extreme Conditions* (CIMEC) desenvolvido para o modelo METRIC (Allen et al., 2013) e válido também para o SEBAL, utilizando percentis de  $T_s$  e  $NDVI$ .

O geeSEBAL apresenta três funções: (i) *Image*: para estimar *ET* diária de uma imagem específica (disponível para JavaScript e Python); (ii) *ImageCollection*: estima a *ET* diária de todas as imagens disponíveis em um intervalo de data selecionado pelo usuário (exclusivo para Python); (iii) *TimeSeries*: estima séries temporais de *ET* para um ponto especificado e o período a ser considerado (exclusivo para Python). A Figura 1 apresenta resumidamente os processos utilizados pelo geeSEBAL.

Figura 1 – Fluxograma dos processos do geeSEBAL, apresentando os dados de sensoriamento remoto e meteorológicos utilizando, assim como as funções para o processamento e estimativas de evapotranspiração.



## Validação das estimativas de ET

As estimativas de ET do geeSEBAL foram comparadas com dados de 10 torres de fluxo no Brasil com sistema EC, localizadas em diferentes biomas e cobertura do solo (Figura 2). Para cada torre, selecionou-se um grupo de percentil otimizado baseado na variação dos percentis do CIMEC (Tabela 1).

Figura 2 – Localização das torres de fluxo (triângulos brancos) utilizadas para validar as estimativas de evapotranspiração do geeSEBAL.

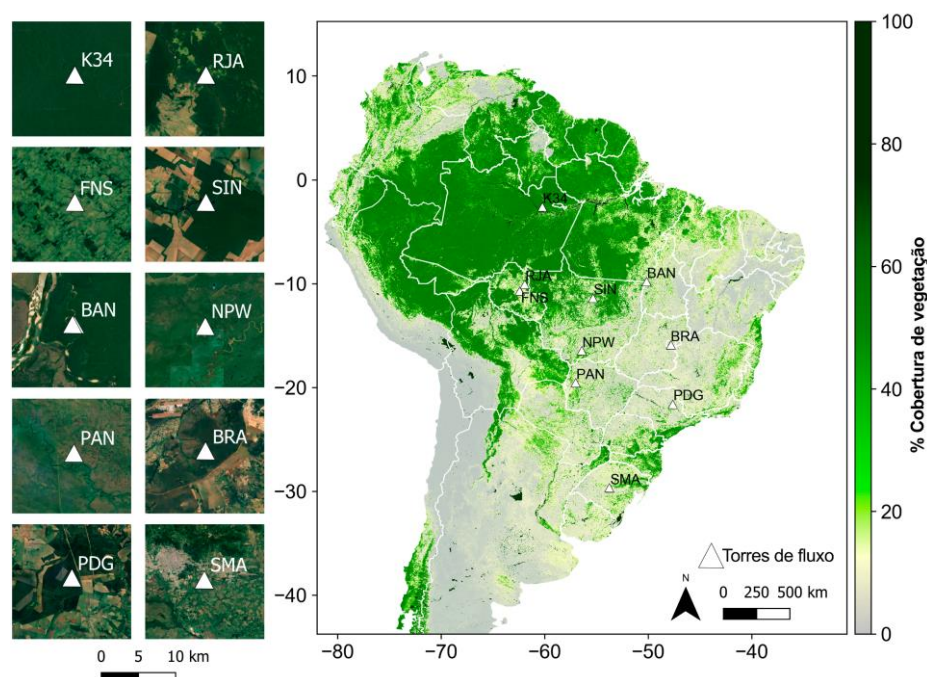


Tabela 1 – Grupos de percentis otimizados utilizados para cada torre do estudo.

Torres	Grupos de percentis			
	$NDVI_{frio}$	$T_{sfrio}$	$NDVI_{quente}$	$T_{squente}$
K34	5%	0.01%	10%	0.01%
RJA	5%	0.01%	10%	0.01%
FNS	5%	1%	1%	10%
SIN	5%	1%	1%	10%
BAN	5%	0.01%	10%	0.01%
NPW	5%	0.1%	10%	0.1%
PAN	5%	1%	10%	1%
BRA	5%	10%	1%	20%
PDG	5%	1%	10%	1%
SMA	5%	1%	1%	10%

## Extração de longas séries temporais

Foi utilizada a função *TimeSeries* para extrair séries temporais em quatro diferentes regiões no Brasil, usando todas as imagens Landsat disponíveis entre 1984 e 2020 com menos de 15% de cobertura de nuvens. As regiões em que foram extraídas as séries temporais são próximas das torres

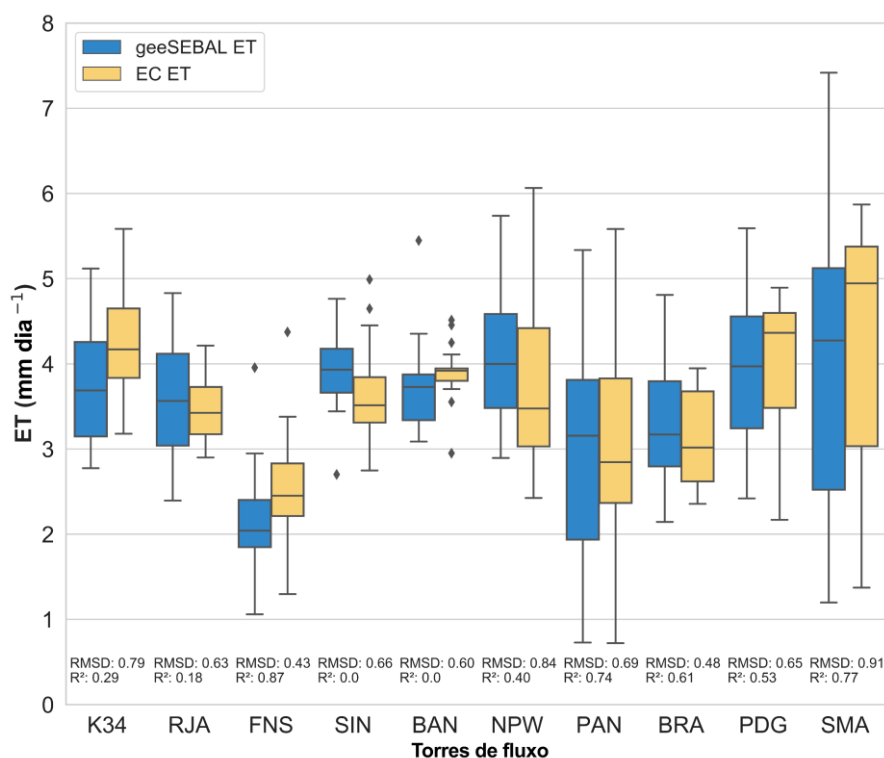


de fluxo RJA, BAN, BRA e SMA, representando diferentes biomas: Cerrado-Bananal, Amazônia-Rondônia, Cerrado-Minas e Pampa-Santa Maria. Foram utilizados os mesmos percentis apresentados na Tabela 1, e as estimativas de ET foram comparadas com dados de uso e cobertura da terra disponibilizado pelo projeto MapBiomas (Souza et al., 2020) (<https://mapbiomas.org>).

## RESULTADOS

A comparação entre os dados observados de ET e as estimativas do geeSEBAL são apresentados na Figura 3 para as 10 torres EC. De um modo geral, as estimativas diárias de ET do geeSEBAL apresentaram resultados satisfatórios, com uma média da raiz do desvio médio quadrático (RMSD) de 0,67 mm dia<sup>-1</sup>. Por outro lado, os valores de correlação (R<sup>2</sup>) obtidos para algumas torres foram baixos devido a disponibilidade de imagens Landsat apenas em certos períodos do ano, coincidentes a períodos de baixa ocorrência de nuvens, ou devido à baixa sazonalidade da ET (como em regiões de florestas tropicais). A torre K34 na Amazônia, por exemplo, apresentou imagens Landsat apenas durante o período seco (Jul-Set), e apesar da grande variabilidade das taxas de ET ao longo do ano, os valores de RMSD e R<sup>2</sup> foram de 0,79 mm dia<sup>-1</sup> e 0,29, respectivamente. No sul da Amazônia, as torres RJA e SIN apresentam diferentes condições hidroclimáticas. Enquanto valores baixos de R<sup>2</sup> para SIN são ocasionados pela disponibilidade de imagens Landsat apenas para o período seco (Abr-Set), em que as taxas de ET se mantêm baixas, o R<sup>2</sup> para RJA apresentou resultado semelhante devido à falta de sazonalidade nas taxas de ET. Mesmo assim, os valores de RMSD foram razoáveis (0,66 e 0,63 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente). Apesar da proximidade com RJA, a torre FNS apresentou menores taxas de ET ao longo do ano devido à vegetação de pastagem, o que implica também uma maior sazonalidade. Nesse caso, R<sup>2</sup> foi de 0,87 e RMSD de 0,43 mm dia<sup>-1</sup>. Na região de transição entre os biomas Amazônia-Cerrado, as estimações do geeSEBAL também foram consistentes comparados aos dados medidos, e apesar dos valores baixos de R<sup>2</sup>, influenciados pela disponibilidade de imagens apenas nos períodos secos, o RMSD para torre BAN apresentou resultados satisfatórios de 0,60 mm dia<sup>-1</sup>.

Figura 3 – Comparativo entre os dados observados de ET e as estimativas do geeSEBAL.



A comparação com a torre PAN localizada no bioma Pantanal demonstra o potencial do geeSEBAL em representar mudanças na disponibilidade hídrica. Apesar de ser uma área caracterizada por períodos sazonais de inundações (período úmido durante Dez-Abr), os dados medidos de 2000/2001 representaram um período de anomalia com a diminuição da ocorrência de chuvas, ocasionando apenas pequenos pontos de inundação ao na região da torre (Oliveira et al., 2006), estabilizando os valores de LE ao longo do ano de 2001. A diminuição das taxas ET ocasionadas por um ano anômalo foi bem representada pelo geeSEBAL, com RMSD de  $0,69 \text{ mm dia}^{-1}$  e razoável  $R^2$  de 0,74. Por outro lado, a torre localizada no pantanal (NPW) não apresentou nenhuma condição extrema de seca ao longo do seu período de medição, e mesmo com uma sazonalidade bem definida e disponibilidade das imagens ao longo do ano, RMSD foi de  $0,84 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $R^2$  de 0,40.

As duas torres localizadas no Cerrado (PDG e BRA) apresentaram diferentes comportamentos. Para PDG, embora os dados de EC demonstraram grande sazonalidade nas estimativas de ET, geeSEBAL apresentou uma superestimação durante o início do período seco, sugerindo um aumento antecipado das estimativas de Rn. Apesar do RMSD de  $0,65 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $R^2$  de 0,53. Para BRA, localizado em uma área de formação de savana com árvores e gramíneas (Santos et al., 2003), os resultados foram mais próximos dos obtidos pelas torres EC, com RMSD de  $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $R^2$  de 0,61. Por fim, a torre mais ao sul do estudo (SMA), caracterizada pela predominância de gramíneas e localizada em clima subtropical com sazonalidade bem definida. em que os valores de ET são diretamente influenciados pela radiação solar (Rubert et al., 2018). Com bons resultados de  $R^2= 0,77$  e RMSD de  $0,91 \text{ mm dia}^{-1}$ , as estimativas do geeSEBAL sugerem que o SEBAL responde apropriadamente com as mudanças na radiação incidente ao longo do ano, como esperado por ser uma variável de entrada do modelo.

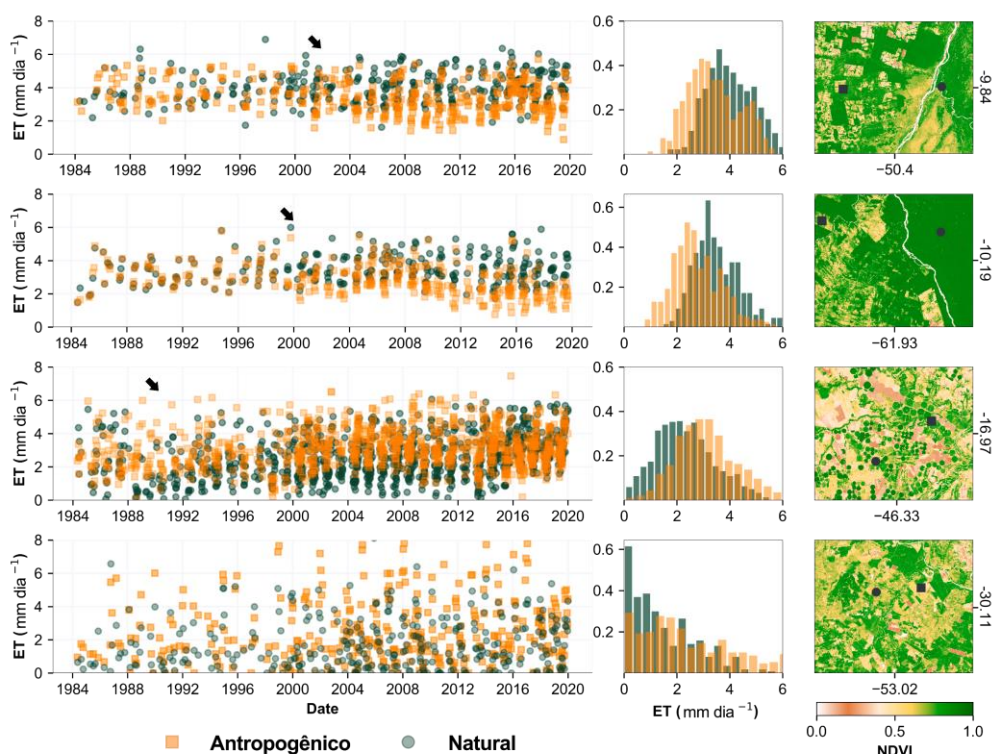
### Longa série temporal

As séries temporais extraídas para quatro regiões diferentes no Brasil são apresentadas na Figura 4, ilustrando mudanças nas taxas de ET associadas a alterações no uso e cobertura da terra nas últimas quatro décadas. A primeira região, Cerrado-Bananal (Figura 4a), fica próxima a região da torre BAN, onde a vegetação natural é representada por uma floresta transicional em área de inundação que não ocorreu mudanças na sua cobertura vegetal, com uma média de ET (1984-2020) de  $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ . Já a série que representa a área antropizada em 2002, apresentava média histórica (1984-2001) de  $3,9 \text{ mm dia}^{-1}$  quando a vegetação era natural, e a média posterior a intervenção decresceu para  $3,1 \text{ mm dia}^{-1}$  devido a conversão para pastagem. Comportamento similar foi observado na área Amazônia-Rondônia (Figura 4b), próxima a torre de fluxo RJA. A floresta tropical preservada na área da reserva biológica do Jarú apresentou uma média histórica (1984-2020) de aproximadamente  $3,51 \text{ mm dia}^{-1}$ , enquanto a área convertida de floresta para pastagem, apresentou alteração de  $3,6 \text{ mm dia}^{-1}$  (para 1984-1999) para  $2,7 \text{ mm dia}^{-1}$  (para 2000-2020).

As áreas localizadas no bioma Cerrado também foram expostas a mudanças de uso e cobertura da terra, apresentando a conversão de vegetação natural em áreas agrícolas desde 1990 (Noojipady et al., 2017), e intensificação de sistemas de irrigação após 2000 (Figura 4c). A área com vegetação natural preservada apresentou média histórica (1984-2020) de  $2,6 \text{ mm dia}^{-1}$ , enquanto a área alterada, com a conversão de vegetação natural do Cerrado a área de plantios agrícolas a partir de 1990 apresentou duas condições: agricultura de sequeiro, com média (para 1990-2000) de  $2,7 \text{ mm dia}^{-1}$ , e agricultura com sistemas de irrigação, com média (para 2001-2020) de  $3,3 \text{ mm dia}^{-1}$ . Dessa forma, as mudanças de uso e cobertura terra associadas a expansão da agricultura irrigada leva a aumentos nas taxas de ET, comparado a vegetação natural do Cerrado. O mesmo foi observado nas áreas com sistemas de irrigações no bioma Pampa, com maiores taxas de ET comparado a vegetação natural, apesar dos baixos valores no período de inverno (de Junho para Setembro). Por outro lado, as áreas irrigadas apresentaram uma média histórica (1984-2020) de  $2,8 \text{ mm dia}^{-1}$ , aumentando em  $4,1 \text{ mm dia}^{-1}$  durante o período de crescimento (de Novembro a Fevereiro) em um sistema de irrigação inundável. Como a maioria das áreas irrigadas estão localizadas em planícies de inundação, as taxas

de ET são maiores do que a vegetação natural mesmo durante o período de repouso do solo, devido principalmente pela alta disponibilidade de água.

Figura 4 – Séries temporais (1984-2020) de evapotranspiração para quatro diferentes regiões do Brasil: (a) Cerrado-Bananal; (b) Amazônia-Rondônia; (c) Cerrado-Minas; (d) Pampa-Santa Maria. A figura apresenta as séries temporais (direita) de uma janela 3x3 dos pontos extraídos, os mapas de NDVI para 2020 (direita), histograma (centro) da distribuição da evapotranspiração e o período em que ocorreu a mudança de uso e cobertura da terra (seta).



## DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na comparação das estimativas do geeSEBAL com dados observados de EC são similares com outros estudos realizados no Brasil. Laipelt et al. (2020) obtiveram para a torre BAN usando SEBAL e dados meteorológicos de reanálise do MERRA-2 um RMSD de 0,37 mm dia<sup>-1</sup> com o mesmo grupo de percentis utilizado nesse estudo, mas com o resultado de 0,58 mm dia<sup>-1</sup>. As diferenças podem ser atribuídas aos diferentes produtos meteorológicos utilizados (MERRA-2 não está disponível no GEE), como também no uso de imagens Landsat 5 e 7 nesse estudo, enquanto em Laipelt et al. (2020) apenas utilizou Landsat 5. Numata et al. (2017) avaliaram a performance do modelo METRIC usando imagens Landsat para a torre RJA. Para os períodos secos entre 2000 e 2002, eles obtiveram um RMSD de 0,81 mm dia<sup>-1</sup>, enquanto nesse estudo foi obtido 0,63 mm dia<sup>-1</sup>. A superestimação em comparação ao geeSEBAL pode ser resultado da escolha de um grupo diferente de percentis utilizados para selecionar os pixels frio e quente. Como exemplo, caso fosse utilizado os percentis sugeridos por Allen et al. (2013), o resultado do RMSD aumentaria para 0,90 mm dia<sup>-1</sup>. Além disso, para o geeSEBAL foi utilizado uma versão simplificada do CIMEC, sem a adição do filtro de vegetação como proposto por Allen et al. (2013). Essa adaptação foi realizada para que o geeSEBAL pudesse estimar ET em qualquer área, sem depender da classificação de uso da terra. Entretanto, visto que a ferramenta é totalmente adaptável, a aplicação desse filtro e outras metodologias para melhorar a acurácia do modelo (Biggs et al., 2016; Dhungel and Barber, 2018; Jaafar and Ahmad, 2019) é totalmente viável.

A estimação diária de ET com o geeSEBAL depende de alguns fatores. A área da imagem, por exemplo, aumentará o processamento à medida que for maior. É importante destacar que, como padrão, o geeSEBAL estima a ET para a área de domínio da imagem Landsat. A diminuição da área estimada, caso o usuário desejar ganho de performance, deve ser feita com precaução visto que a alteração da área de domínio apresenta um impacto direto no modelo SEBAL (dos Santos et al., 2020; Long et al., 2011) devido a alteração dos pixels candidatos.

O tempo de processamento do geeSEBAL está entre 3-5 min para cada imagem Landsat (185 km x 185 km). Além disso, como o processamento é realizado através dos supercomputadores onde estão localizados os servidores do GEE, a capacidade de processamento do computador não é algo relevante para a aplicação do geeSEBAL, entretanto, a velocidade de conexão com os servidores pode impactar no processamento.

Apesar de utilizar imagens Landsat, outros produtos podem ser utilizados com o geeSEBAL, como no caso de imagens MODIS para melhorar a resolução temporal das estimativas de ET e que já demonstraram resultados satisfatórios com o modelo SEBAL em estudos anteriores (Kiptala et al., 2013; Ruhoff et al., 2012). Novos dados meteorológicos (e.g., dados de reanálise do ERA) também serão incluídos no geeSEBAL assim que se tornarem disponíveis no GEE.

## CONCLUSÃO

O uso de modelos de balanço energético da superfície é uma opção viável para aplicações envolvendo o uso da água. Nesse estudo, é introduzido o geeSEBAL, uma ferramenta de código aberto com opção de GUI desenvolvido para estimar ET em diferentes escalas ao longo do globo. Essa ferramenta permite diversas aplicações na área de ciência da terra juntando SEBAL com o processamento do GEE, permitindo uma maneira rápida e acurada para estimar ET. A comparação entre dados EC e estimados do geeSEBAL demonstraram a capacidade do modelo em diferentes tipos de vegetação e biomas, apresentando resultados razoáveis de RMSD  $<0,7 \text{ mm dia}^{-1}$  para a maioria das torres. Ainda, as longas séries temporais de ET para diferentes regiões do Brasil demonstraram o potencial do geeSEBAL para estudos de impactos de mudanças do uso e cobertura da terra ao longo das décadas. Por fim, a compreensão das dinâmicas envolvendo ET é crucial para mitigação dos impactos da depleção da água nos ecossistemas devido, por exemplo, ao aumento da demanda de água para produção de alimentos e abastecimento urbano. O autor espera que a ferramenta seja útil para o desenvolvimento de estudos em largas escalas envolvendo o uso da água e o balanço energético, assim como o gerenciamento da água como um todo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FLUXNET, AMERIFLUX, ao projeto LBA (Large-Scale Biosphere and Atmosphere Experiment in the Amazon) e aos pesquisadores Dra. Débora Roberti e Dr. Marcelo Biudes pela disponibilidade de dados.

## REFERÊNCIAS

- Allen, R., Kilic, A., Trezza, R., Hendrickx, J., Bastiaanssen, W.G.M., Kjaersgaard, J., 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrol. Process.* 25, 4011–4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>
- Allen, R., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., Robison, C., 2015. EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine, in: 2015 ASABE / IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation - A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings. American Society of Agricultural and Biological Engineers, pp. 1–11. <https://doi.org/10.13031/irrig.20152143511>
- Allen, R.G., Burnett, B., Kramber, W., Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Kelly, C., Trezza, R., 2013. Automated Calibration of the METRIC-Landsat Evapotranspiration Process. *JAWRA J. Am. Water*



- Resour. Assoc. 49, 563–576. <https://doi.org/10.1111/jawr.12056>
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Alonso, A., Muñoz-Carpena, R., Kaplan, D., 2020. Coupling high-resolution field monitoring and MODIS for reconstructing wetland historical hydroperiod at a high temporal frequency. *Remote Sens. Environ.* 247, 111807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111807>
- Anderson, M., 1997. A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing. *Remote Sens. Environ.* 60, 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
- Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Dr. thesis, Wageningen Agric. Univ. Wageningen Netherlands. SC-DLO, Wageningen. <https://doi.org/90-5485-465-0>
- Bastiaanssen, W.G.M., Thiruvengadachari, S., Sakthivadivel, R., Molden, D.J., 1999. Satellite Remote Sensing for Estimating Productivities of Land and Water. *Int. J. Water Resour. Dev.* 15, 181–194. <https://doi.org/10.1080/07900629949005>
- Bhattarai, N., Dougherty, M., Marzen, L.J., Kalin, L., 2012. Validation of evaporation estimates from a modified surface energy balance algorithm for land (SEBAL) model in the south-eastern United States. *Remote Sens. Lett.* 3, 511–519. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.632655>
- Biggs, T., Petropoulos, G.P., Velpuri, N.M., Marshall, M., Glenn, E.P., Nagler, P.L., Messina, A., 2015. Remote Sensing of Actual Evapotranspiration from Cropland: Chapter 3, in: Thenkabail, P.S. (Ed.), *Remote Sensing Handbook, Vol. III: Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies*. CRC Press.
- Biggs, T.W., Marshall, M., Messina, A., 2016. Mapping daily and seasonal evapotranspiration from irrigated crops using global climate grids and satellite imagery: Automation and methods comparison. *Water Resour. Res.* 52, 7311–7326. <https://doi.org/10.1002/2016WR019107>
- Dhungel, S., Barber, M., 2018. remote sensing Estimating Calibration Variability in Evapotranspiration Derived from a Satellite-Based Energy Balance Model. *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10111695>
- dos Santos, C.A.C., Mariano, D.A., das Chagas A. do Nascimento, F., da C. Dantas, F.R., de Oliveira, G., Silva, M.T., da Silva, L.L., da Silva, B.B., Bezerra, B.G., Safa, B., de S. Medeiros, S., Neale, C.M.U., 2020. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 85, 101982. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101982>
- Fisher, J.B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M.F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P.A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D.D., Perret, J., Lagouarde, J.-P., Waliser, D., Purdy, A.J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J.S., Stephens, G., Wood, E.F., 2017. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resour. Res.* 53, 2618–2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- Hird, J.N., DeLancey, E.R., McDermid, G.J., Kariyeva, J., 2017. Google Earth Engine, Open-Access Satellite Data, and Machine Learning in Support of Large-Area Probabilistic Wetland Mapping. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs9121315>
- Jaafar, H.H., Ahmad, F.A., 2019. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.033>
- Kennedy, R., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W., Healey, S., 2018. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sens.* 10, 691. <https://doi.org/10.3390/rs10050691>
- Kiptala, J.K., Mohamed, Y., Mul, M.L., der Zaag, P., 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resour. Res.* 49, 8495–8510. <https://doi.org/10.1002/2013WR014240>
- Laipelt, L., Ruhoff, L.A., Fleischmann, S.A., Kayser, H.R., Kich, D.E., da Rocha, R.H., Neale, M.C., 2020. Assessment of an Automated Calibration of the SEBAL Algorithm to Estimate Dry-Season Surface-Energy Partitioning in a Forest–Savanna Transition in Brazil. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs12071108>

- Long, D., Singh, V.P., Li, Z.-L., 2011. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? *J. Geophys. Res. Atmos.* 116. <https://doi.org/10.1029/2011JD016542>
- Noojipady, P., Morton, C.D., Macedo, N.M., Victoria, C.D., Huang, C., Gibbs, K.H., Bolfe, L.E., 2017. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. *Environ. Res. Lett.* 12, 25004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5986>
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.* 77, 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., Cochrane, M.A., Silva, S.S., 2017. Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9010046>
- Oliveira, M., Von Randow, C., Manzi, A., Alvalá, R., Sá, L., Leitão, M., Souza, A., 2006. Fluxos Turbulentos de Energia sobre o Pantanal Sul Mato-Grossense. *Rev. Bras. Meteorol.* 21, 159–165.
- Parente, L., Taquary, E., Silva, A.P., Souza, C., Ferreira, L., 2019. Next Generation Mapping: Combining Deep Learning, Cloud Computing, and Big Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 11, 2881. <https://doi.org/10.3390/rs11232881>
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Rubert, G., Roberti, D., Pereira, L., Quadros, F., Campos Velho, H., Leal de Moraes, O., 2018. Evapotranspiration of the Brazilian Pampa Biome: Seasonality and Influential Factors. *Water* 10, 1864. <https://doi.org/10.3390/w10121864>
- Ruhoff, A., Paz, A., Collischonn, W., Aragão, L., Rocha, H., S. Malhi, Y., 2012. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas, *Remote Sensing*, vol. 4, issue 3, pp. 703–725. <https://doi.org/10.3390/rs4030703>
- Santos, A.J.B., Silva, G.T.D.A., Miranda, H.S., Miranda, A.C., Lloyd, J., 2003. Effects of fire on surface carbon, energy and water vapour fluxes over campo sujo savanna in central Brazil. *Funct. Ecol.* 17, 711–719. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2003.00790.x>
- Saraiva, M., Protas, É., Salgado, M., Souza, C., 2020. Automatic Mapping of Center Pivot Irrigation Systems from Satellite Images Using Deep Learning. *Remote Sens.* 12, 558. <https://doi.org/10.3390/rs12030558>
- 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 J. Am. Water Resour. Assoc.* 49, 577–591. <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- Souza, C.M., Z. Shimbo, J., Rosa, M.R., Parente, L.L., A. Alencar, A., Rudorff, B.F.T., Hasenack, H., Matsumoto, M., G. Ferreira, L., Souza-Filho, P.W.M., de Oliveira, S.W., Rocha, W.F., Fonseca, A. V., Marques, C.B., Diniz, C.G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E.R., Vélez-Martin, E., Weber, E.J., Lenti, F.E.B., Paternost, F.F., Pareyn, F.G.C., Siqueira, J. V., Viera, J.L., Neto, L.C.F., Saraiva, M.M., Sales, M.H., Salgado, M.P.G., Vasconcelos, R., Galano, S., Mesquita, V. V., Azevedo, T., 2020. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Tang, R., Li, Z.-L., Chen, K.-S., Jia, Y., Li, C., Sun, X., 2013. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. *Agric. For. Meteorol.* 174–175, 28–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.008>
- Teixeira, A.H. de C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D., Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agric. For. Meteorol.* 149, 462–476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>
- Vos, K., Splinter, K.D., Harley, M.D., Simmons, J.A., Turner, I.L., 2019. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environ. Model. Softw.* 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Yang, Y., Shang, S., Jiang, L., 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agric. For. Meteorol.* 164, 112–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.011>