

REGULAÇÃO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

TEODORICO ALVES SOBRINHO
ORGANIZADOR



© 2023 - Teodorico Alves Sobrinho

TÍTULO

REGULAÇÃO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

ORGANIZADOR

Teodorico Alves Sobrinho

ELABORAÇÃO DOS ORIGINAIS

Coordenadores dos projetos no programa
Comissão ANA-CPES de Acompanhamento do
Programa Pró-Recursos Hídricos

REVISÃO

Eva Mercedes Martins Gomes

DIAGRAMAÇÃO

Ricardo Barbosa Porto

CAPA E INFOGRÁFICOS

Raquel de Faria Godoi Silva

EDIÇÃO, PROJETO GRÁFICO

Editora Oeste

PUBLICAÇÃO DA



Editora
Oeste

www.editoraoeste.com.br

contato@editoraoeste.com.br

ISBN 978-854558448-3

Depósito Legal na Biblioteca Nacional

Impresso no Brasil

livro disponível em:

<https://www.editoraoeste.com.br/145-prorecursos>

ILUSTRAÇÕES DA CAPA

©2011 CIAT/NeilPalmer. (CC BY-SA 2.0) | <https://www.flickr.com/photos/ciat/5641025611/in/album-72157631668947220/>.

Boris1968 | <https://www.freeimages.com/photo/reflecting-trees-in-pantanal-1554972>.

Fairmont Butte, California | <https://www.freeimages.com/photo/aerial-view-of-fairmont-butte-california-2063262>.

Itaipu International (CC BY 2.0) | <https://www.flickr.com/photos/hydropower/5915176674/in/set-72157627144851872>.

Alexandre Saraiva Carniato | <https://www.pexels.com/photo/person-in-red-and-white-shirt-standing-on-water-5597772/>.

Creative Vix. (CC0 1.0) | <https://www.pexels.com/photo/person-pouring-water-photography-9749/>.

Porto de Santos (SP) (CC BY-NC-SA 2.0) | <https://www.flickr.com/photos/pacgov/6006197603>.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

R344

Regulação e gestão de recursos hídricos no Brasil / Teodorico Alves Sobrinho (Organizador);
Raquel de Faria Godoi Silva (Ilustradora). – Campo Grande: Oeste, 2023.

392 p., il., fotos.; 15 X 22 cm

ISBN 978-85-45584-48-3

1. Engenharia sanitária. 2. Gestão. 3. Previsões climáticas. 4. Hidrologia. I. Alves Sobrinho,
Teodorico (Organizador). II. Silva, Raquel de Faria Godoi (Ilustradora). III. Título.

CDD 628

Índice para catálogo sistemático

I. Engenharia sanitária

TEODORICO ALVES SOBRINHO
ORGANIZADOR

REGULAÇÃO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL



Editora
Oeste

Campo Grande
2023

Estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto para gestão de recursos hídricos no Brasil

Humberto Ribeiro da Rocha

Anderson Luis Ruhoff

Débora Regina Roberti

Luiz Eduardo de Oliveira Cruz e Aragão

Projeto construído em parceria de instituições para desenvolver tecnologias inovadoras para monitoramento do uso da água, em escala nacional, baseadas em dados meteorológicos, hidrológicos e de satélite. Entre os objetivos, buscou-se aprimorar estimativas de evapotranspiração (ET), em escala local e regional, utilizando-se modelos com base no balanço de energia, para várias regiões climáticas e condições de uso da terra no Brasil. Medições do balanço de energia e especialmente da ET pelo método da covariância de vórtices turbulentos, e de componentes do balanço hídrico em escala de bacia (umidade do solo, vazão, precipitação) foram utilizados para validação. De forma inédita, os resultados contribuíram para desenvolvimento de modelos de ET, como o geeSEBAL, o aprimoramento de outros modelos, como o modelo de ET denominado SSEBOP, e modelos de ET e estresse hídrico como o SiB2. Estes modelos utilizam informações do Landsat e MODIS como condição de contorno, e as forçantes meteorológicas como dados de medição local ou de reanálise como o ERA-5-Land, estimando a ET desde a escala horária até diária. As estimativas tiveram acurácia, com desempenho superior a outros modelos baseados no balanço de energia amplamente utilizados em escala global, mostrando-se úteis e eficientes ferramentas para a gestão de recursos hídricos.

Palavras-chave: balanço de energia; evapotranspiração; geeSEBAL; SSEBOP; SiB2, OpenET.

As questões da quantidade e a qualidade dos recursos hídricos é uma preocupação mundial, principalmente quando se espera um crescimento populacional de cerca de 9 bilhões até 2050 (UN-Water, 2010), demandando crescimento na produção de alimentos e, conseqüentemente, aumento do consumo de água na agricultura, que podem se intensificar com as mudanças climáticas, que indicam escassez de água mais severamente nas regiões áridas e semiáridas (Anderson *et al.*, 2012).

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) busca assegurar a disponibilidade de água em qualidade e em quantidade adequada à atual e às futuras gerações, por meio dos seus instrumentos de gestão de recursos hídricos. Assim, é fundamental o conhecimento da demanda hídrica atual e a disponibilização de ferramentas que realizem o monitoramento sistemático da disponibilidade de água, com informações confiáveis para uma eficiente gestão.

Conforme o Atlas da Irrigação (ANA, 2021), há previsão de aumento de 45% de áreas irrigadas e de 42% no consumo de água para irrigação no Brasil até o ano de 2030, com o país entre os 10 maiores de área para irrigação do mundo. Convém frisar que o entendimento da disponibilidade hídrica em pequena escala é fundamental para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que o Brasil utiliza cerca de 50% da captação de água bruta de mananciais para irrigação (ANA, 2021), em uma tendência de rápida expansão, mas com limitada rede de monitoramento.

Associado ao intenso uso da água na agricultura, crises relacionadas à disponibilidade hídrica decorrente das variações no regime de precipitação exigiram o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o monitoramento e a fiscalização do uso da água, em áreas agrícolas irrigadas. Um dos processos hidrometeorológicos de fundamental importância para a compreensão da disponibilidade hídrica é a evapotranspiração (ET), que transfere grandes volumes de água para

a atmosfera, influenciando nas condições meteorológicas e disponibilidade de umidade do solo (Anderson *et al.*, 2012). Informações espacialmente distribuídas de ET, em uma escala espacial adequada às modificações antrópicas dos usos da água, vêm se apresentando como uma necessidade inerente aos processos de gestão de recursos hídricos, em escala nacional.

O monitoramento da ET, desde escalas locais, regionais e até continentais, usualmente é realizado a partir de observações feitas no campo e por sistemas de sensores remotos. Muitos esforços têm sido realizados para melhorar as estimativas espaciais e temporais da ET baseadas em dados de sensoriamento remoto, como uma poderosa ferramenta de informações, compatíveis com a escala de campo para o monitoramento do uso da água na agricultura (Biggs *et al.*, 2015).

O uso de informações derivadas de sensoriamento remoto para monitoramento do uso da água na irrigação consiste em tecnologias de estado da arte, como no Brasil (ANA, 2020), Estados Unidos (Melton *et al.*, 2022), na plataforma OpenET (disponível em <https://openetdata.org>), além de áreas do continente africano e do Oriente Médio, na plataforma FAO-WAPOR (disponível em <https://wapor.apps.fao.org/>).

As soluções baseadas em sensoriamento remoto foram desenvolvidas para minimizar inconsistências nos métodos relacionados às medições e informações de uso consuntivo da água, tanto na escala de lavoura agrícola quanto em grandes áreas (bacias hidrográficas até grandes regiões geográficas). Entretanto, os métodos existentes carecem de validação, de calibração e de aprimoramentos que reflitam a realidade climática e hidrológica da área da aplicação e que permita a obtenção de estimativas de ET com maior exatidão (MELTON *et al.*, 2022).

Um modelo simplificado de balanço de energia, o SSEBOP (Operational Simplified Surface Energy Balance) (Senay *et al.*, 2013), é amplamente utilizado e difundido pela ANA (ANA, 2020). Neste projeto, buscou-se avançar na complexidade de processos com modelos que representem a ET e a produtividade como fluxo de CO₂. Os avanços científicos do projeto resultaram em modelos parcimoniosos com representação complexa dos processos físicos, com eficiência para processamento em ambientes de computação em nuvem, o geeSEBAL (Google Earth Engine implementation of the Surface Energy Balance Algori-

thm for Land) (Laipelt *et al.*, 2021; Bastiaanssen *et al.*, 1998), disponível em <https://etbrasil.users.earthengine.app/view/geesebal>.

Um modelo com representação de multiprocessos para estimativa do balanço de energia e CO₂ com esquemas de assimilação de sensoriamento remoto para prescrição de parâmetros fisiológicos (transferência radiativa, momentum, conexão fotossíntese-transpiração, partição da ET, infiltração e retenção de água no solo), o Simple Biosphere model SiB2 (SELLERS *et al.* 1996), foi utilizado no projeto como uma das ferramentas de estimativa da ET. Nesse contexto estabeleceu-se uma parceria multi-institucional composta pelo IAG/USP, IPH/UFRGS, UFSM e DSR/INPE.

As atividades desenvolvidas por todo grupo envolveram modelagem com SSEBOP e geeSEBAL (IPH UFRGS), medição dos fluxos de superfície no bioma Pampa (UFSM), medição dos fluxos turbulentos e hidrológicos nos biomas Mata Atlântica e Cerrado, e modelagem de ET e estresse hídrico com o SiB2 model (IAG USP) e aplicações de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto para análise de ET (DSR/INPE).

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Utilizar técnicas modernas de sensoriamento remoto, métodos micrometeorológicos e hidrometeorológicos de campo, para várias regiões do Brasil, com soluções modernas da estimativa de ET e em geral da disponibilidade hídrica superficial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. utilizar medições de campo para calibração e validação dos modelos de ET e do balanço de água e energia, utilizando torres de fluxo e sensores hidrometeorológicos, em vários sítios experimentais, no Brasil, incluindo vegetação natural (florestas tropicais e subtropicais,

remanescentes de cerrado e bioma pampa) e áreas agrícolas (soja, arroz irrigado, silvicultura e pastagem);

- II. aperfeiçoar modelos de estimativas de ET com auxílio de sensoriamento remoto, visando melhorar o balanço hídrico em escala local e regional.

IMPACTOS

Como avanço do estado da arte na área do conhecimento da linha de pesquisa, o uso de informações de sensoriamento remoto para monitoramento do uso da água, na agricultura consiste em uma excelente alternativa para áreas de diversas escalas. Nesse contexto, os métodos apresentaram grandes vantagens em estimar de ET de forma inovadora e consistente, tanto em escala de lavoura agrícola quanto em grandes áreas (desde bacias hidrográficas até grandes regiões geográficas), podendo ser utilizada para:

- I. propiciar a expansão da agricultura sustentável, comparando o uso da água em culturas agrícolas com a vegetação natural, de forma a minimizar os impactos relacionados as mudanças de uso da terra;
- II. disponibilizar informações de disponibilidade hídrica, para uso da água entre abastecimento humano, agricultura, energia e ecossistemas;
- III. possibilitar o monitoramento e a fiscalização do uso dos recursos hídricos em áreas irrigadas, critérios de outorga e direitos de uso da água;
- IV. possibilitar a gestão adequada dos recursos hídricos e governança para a utilização da água em conjuntura de criticidade hídrica.

No contexto do projeto, foram desenvolvidas pesquisas científicas em nível de mestrado, doutorado e pós-doutorado que envolveram (i) a validação de modelos de estimativa de ET com imagens dos satélites/sensores Landsat e MODIS: geeSEBAL (Laipelt *et al.*, 2021; Kayser *et al.*, 2022); SSEBOP (Andrade *et al.*,

2021); MOD16 (Souza *et al.*, 2019; Moreira *et al.*, 2019); GLEAM (Moreira *et al.*, 2019); SiB2 (Conceição *et al.* 2023), (ii) aperfeiçoamento dos fluxos de calor no solo em modelos de balanço de energia (Andrade *et al.*, 2020); (iii) impactos das mudanças de uso da terra em áreas de expansão agrícola dos biomas Cerrado e Amazonia (Laipelt *et al.*, 2020) e nos biomas brasileiros (Caballero *et al.*, 2022); (iv) impactos da propagação de secas na disponibilidade hídrica nos biomas brasileiros (Rossi *et al.*, 2023) e áreas de captação de reservatórios de água (Domingues *et al.* 2022); (v) análises de balanço hídrico em escala continental e quantificação de incertezas para estimativas de ET e disponibilidade hídrica (Moreira *et al.*, 2019; Ruhoff *et al.*, 2022); (vi) estimativas localmente relevantes de ET em escala continental por sensoriamento remoto termal (Andrade *et al.*, 2023; em fase de revisão); (vii) estimativas de evaporação de reservatórios em escala nacional (Rossi *et al.*, 2023; em fase de revisão); (viii) medição dos fluxos turbulentos (Rubert *et al.*, 2018, 2022; Diaz *et al.*, 2019) e das propriedades termais dos solos, no bioma Pampa (Zimmer *et al.*, 2023); (ix) medições hidrológicas e micrometeorológicas em bacias de monitoramento no bioma Mata Atlântica (Chittolina *et al.*, 2023; Chittolina 2020; Josef 2020; Josef *et al.* 2023) e Cerrado (Conceição *et al.* 2023; Conceição 2023) e (x) modelagem de ET, em grande escala na Amazonia (Baker *et al.*, 2021).

AVANÇO DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO PROJETO

O desenvolvimento do modelo geeSEBAL e o aprimoramento do modelo SSEBOP permitiu inúmeras aplicações para gestão de recursos hídricos em escala nacional, no Brasil, desde o monitoramento de áreas agrícolas em escala de campo (compatível com atividades de monitoramento e fiscalização *in situ*), estimativas de ET de áreas agrícolas irrigadas em intervalo de tempo diário a partir de imagens dos satélites Landsat e estimativas de séries temporais de intervalos de 8-dias e, mensal, a partir da utilização de imagens do sensor Terra e Aqua MODIS.

Os resultados obtidos a partir da validação e da análise desses modelos demonstram a confiabilidade para aplicações, no Brasil, no monitoramento do

uso da água na agricultura. A calibração e a validação dos modelos de balanço de energia para estimativas de ET somente se tornam possível em decorrência da disponibilidade de medições de fluxos turbulentos de calor latente e ET nos diferentes biomas brasileiros, principalmente para redução de viés, ajustes de fase e melhoria da acurácia.

A baixa disponibilidade de informações medidas pode, por exemplo, reduzir o desempenho dos modelos em função de menor grau de calibração e baixa da representatividade espacial dos processos de interação superfície-atmosfera. Os resultados científicos obtidos neste projeto vêm de encontro a fomentar diagnósticos do balanço hídrico, com ênfase na ET e na disponibilidade hídrica, desde escalas locais até escalas continentais, para auxiliar no gerenciamento das demandas de água e atendendo aos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

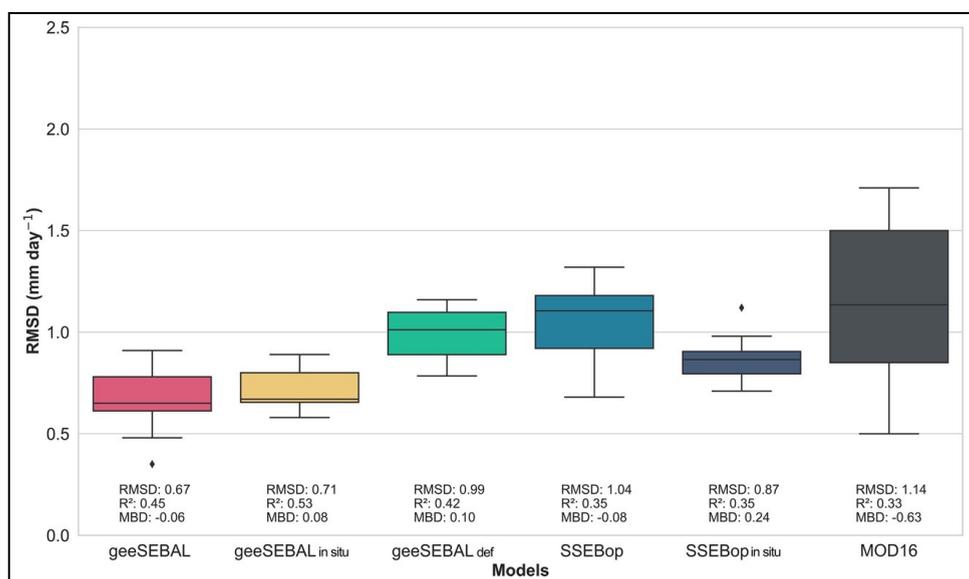


Figura 1. Acurácia das estimativas de ET no Brasil a partir da comparação com dados medidos pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos (Eddy Covariance) para os modelos geeSEBAL, SSEBOP e MOD16 utilizando dados meteorológicos observados e reanálise ERA5-Land. **Fonte:** Laipelt *et al.* (2021).

O desenvolvimento do modelo geeSEBAL (Laipelt *et al.*, 2021; Andrade *et al.*, 2023) pode ser aplicado a imagens Landsat e MODIS para estimativas multi escala, de 30 a 500 m, respectivamente, bem como a atualização do modelo SSEBOP (Senay *et al.*, 2023), permitiu a obtenção de estimativas de ET para o Brasil com alta acurácia (Figura 1).

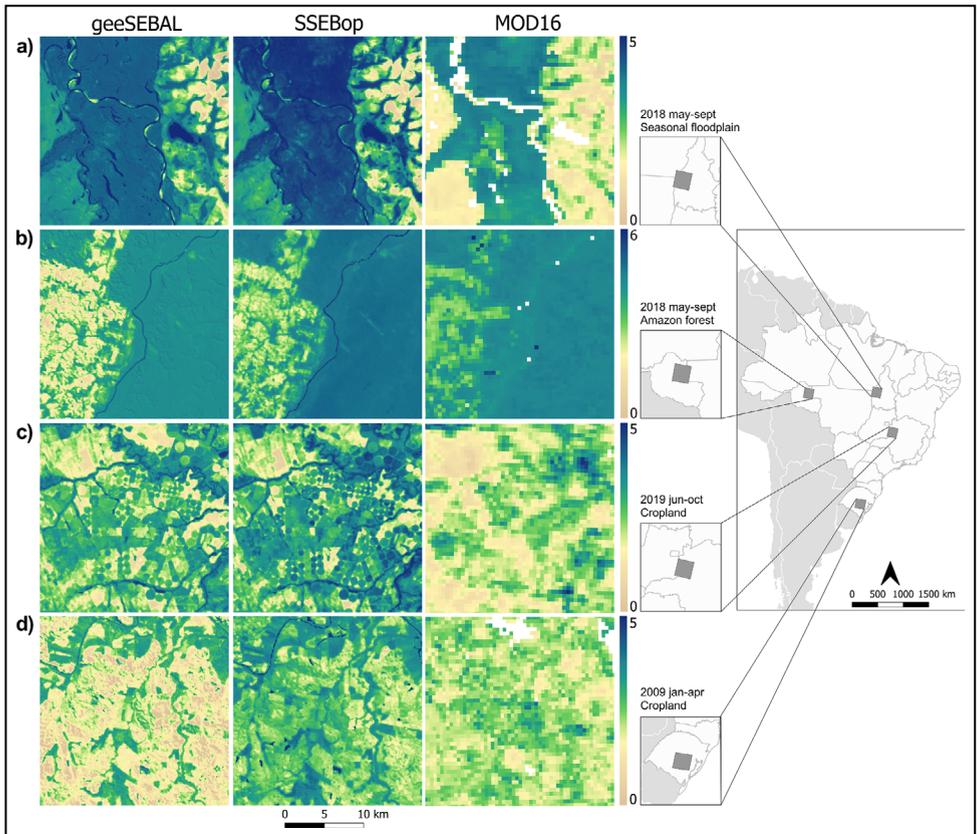


Figura 2. Padrões espaciais de ET em distintas condições climáticas e de uso e cobertura da terra no Brasil, obtidas a partir do processamento de series históricas de imagens LANDSAT utilizando computação em nuvem e processamento com base em múltiplos modelos (geeSEBAL, SSEBOP e MOD16). **Fonte:** Laipelt *et al.* (2021).

Os resultados indicam potencialidade para monitoramento de áreas agrícolas e áreas que sofreram mudanças de uso e cobertura da terra. A Figura 2 apresenta, como exemplo, o padrão espacial e temporal de áreas com transição de

mudanças de uso e cobertura da terra em áreas selecionadas no Brasil. É possível observar disponibilidade hídrica superficial de áreas úmidas (Fig. 2a), diferenças nas taxas de ET de áreas naturais (florestas) e áreas agrícolas/pastagens (Fig. 2b) e uso da água em áreas irrigadas na região central e sul do Brasil, com pivôs de irrigação (Fig. 2c) e irrigação por inundação (Fig. 2d).

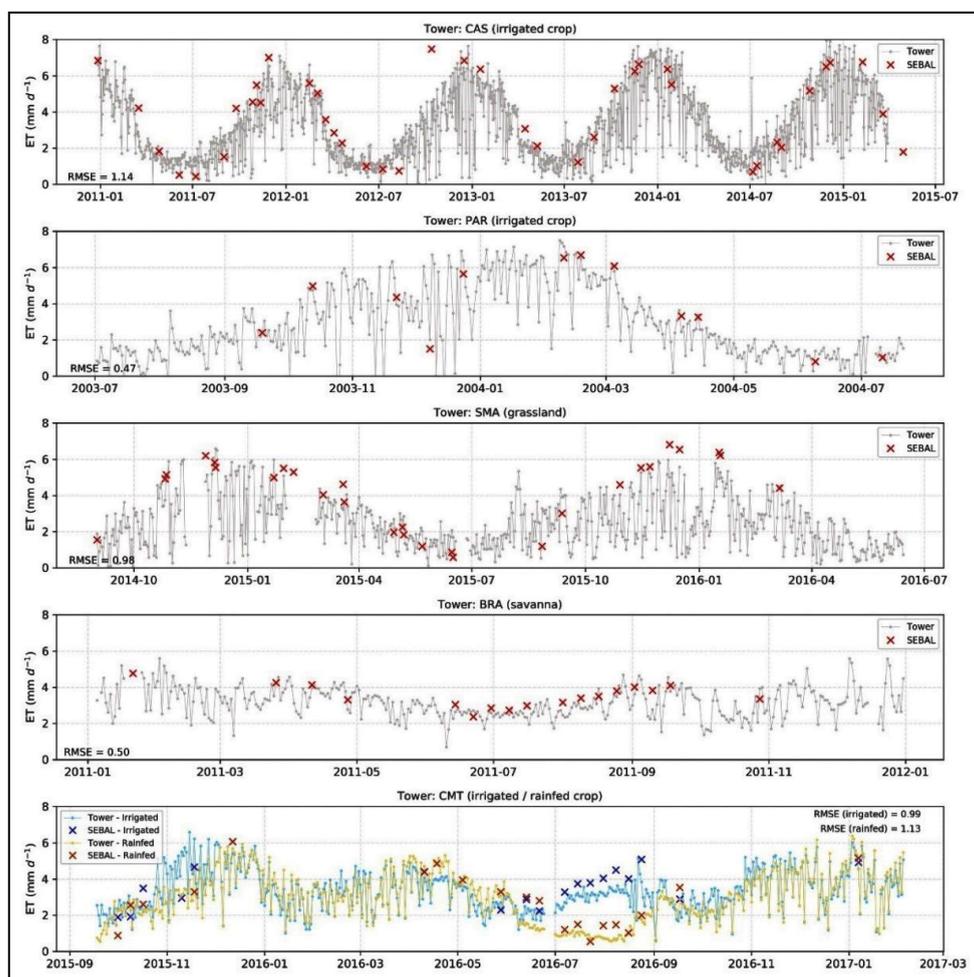


Figura 3. Comparação das estimativas de ET a partir do modelo geeSEBAL em áreas agrícolas irrigadas e não-irrigadas, em comparação com áreas de vegetação natural. Créditos dos dados: SULFLUX (para os sítios CAS, PAR e SMA), LBA-ECO (para o sítio BRA) e Lathuilliere *et al.* (2018) para o sítio CMT. **Crédito da imagem:** Rafael Kayser.

Aplicações do modelo geeSEBAL com imagens Landsat em diferentes áreas do bioma pampa são apresentadas na Figura 3, na qual as áreas agrícolas irrigadas correspondem aos sítios experimentais CAS e PAR (localização em Cachoeira do Sul e Paraíso do Sul (RS), respectivamente, com cultivo de arroz irrigado por inundação), CMT (localização em Lucas do Rio Verde (MT), com cultivos agrícolas em pivô de irrigação, em comparação com áreas de vegetação natural SMA (Santa Maria (RS, com vegetação de gramíneas do bioma Pampa) e BRA (localização em Brasília (DF), com vegetação nativa de cerrado).

Verifica-se a grande capacidade do modelo, na diferenciação de diferentes condições de uso e cobertura da terra, possibilitando a distinção entre áreas agrícolas irrigadas e não-irrigadas, tal como evidenciado no sítio CMT (Lathuilliere *et al.*, 2018) que diferencia os dois tipos de cultivos, em comparação com áreas de vegetação natural.

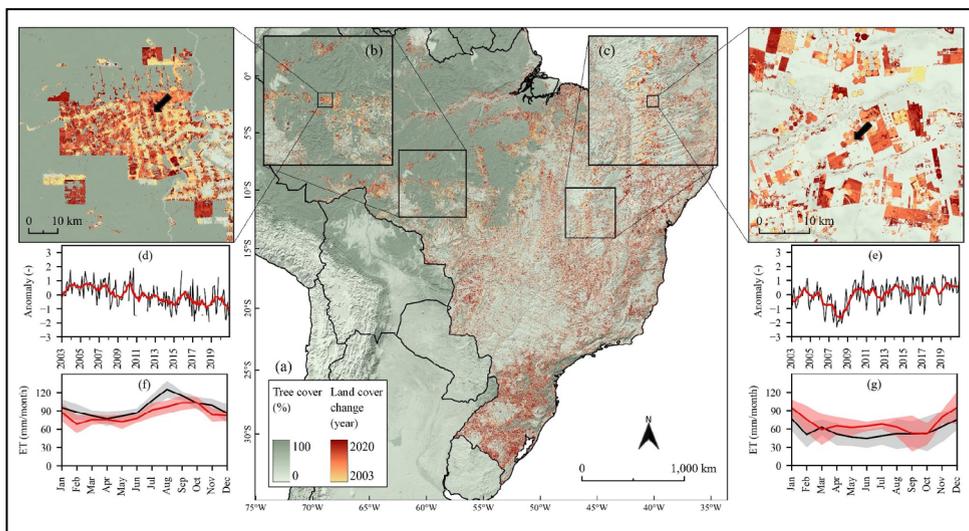


Figura 4. Mudanças de uso e cobertura da terra no Brasil e impactos no processo de ET decorrentes de expansão da agricultura de sequeiro e agricultura irrigada, estimados a partir de imagens do sensor MODIS para o período 2003-2020. Fonte: Andrade *et al.*, 2023.

Em escala continental, a aplicação do modelo geeSEBAL com imagens MODIS (Andrade *et al.*, 2023), usando o balanço de energia, possibilitou a

obtenção de estimativas localmente relevantes de ET, em escala continental por sensoriamento remoto termal. As estimativas agrupadas em intervalos temporais de 8 dias permitem uma compreensão ampla dos processos de ET em grandes áreas, permitindo, por exemplo, análises detalhadas de balanço e disponibilidade hídricas nas principais bacias hidrográficas da América do Sul, impactos das mudanças de uso e cobertura da terra nas interações superfície-atmosfera (Figura 4) e estimativas de evaporação dos grandes reservatórios brasileiros (Figura 5).

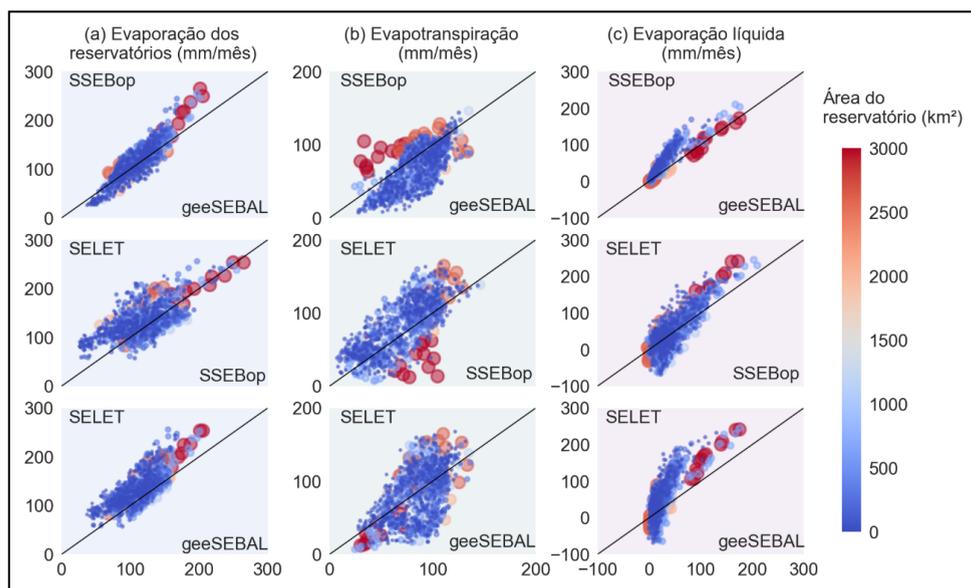


Figura 5. Estimativas (2003-2019) dos modelos geeSEBAL e SSEBop em comparação com o modelo de evaporação SELET para (a) evaporação de águas abertas, (b) ET do entorno (em área de 5 km ao redor do reservatório) e (c) evaporação líquida, definida como a evaporação do lago menos a ET do entorno.

Obteve-se um entendimento mais amplo do balanço de energia nos ecossistemas de Cerrado (Cerrado restrito) e na Mata Atlântica (pastagem), ao investigar o papel e impacto da variabilidade climática na ET, utilizando um conjunto de moderno instrumental de medições de campo por um intervalo bastante extenso, e com o modelo SiB2 (Conceição 2020; Conceição *et al.* 2023).

Para minimizar as incertezas da estimativa dos fluxos de calor sensível e ET medidos pelo método da covariância dos vórtices turbulentos (eddy covariance), devido ao fechamento do balanço de energia, aplicou-se a correção baseada na Razão de Bowen. As variáveis meteorológicas e os fluxos de calor sensível e latente mostraram sazonalidade marcante, mais notável no cerrado.

A ET anual foi significativamente maior na Mata Atlântica, separadamente por estação chuvosa e seca. Esse padrão sazonal tem uma contrapartida no campo espacial médio do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), marcadamente no Cerrado PEG, com valores altos no Verão (janeiro) e menores no fim do inverno (setembro), e com baixa sazonalidade na Mata Atlântica (Figura 6).

Para o preenchimento de falhas das séries históricas dos fluxos micrometeorológicos na resolução horária, utilizamos o Simple Biosphere model (SiB2) (Sellers *et al.* 1996), forçado com dados meteorológicos medidos no campo, e calibrado com parâmetros de índice de área foliar e fração de radiação fotossinteticamente absorvida estimadas com sensoriamento remoto, na escala mensal.

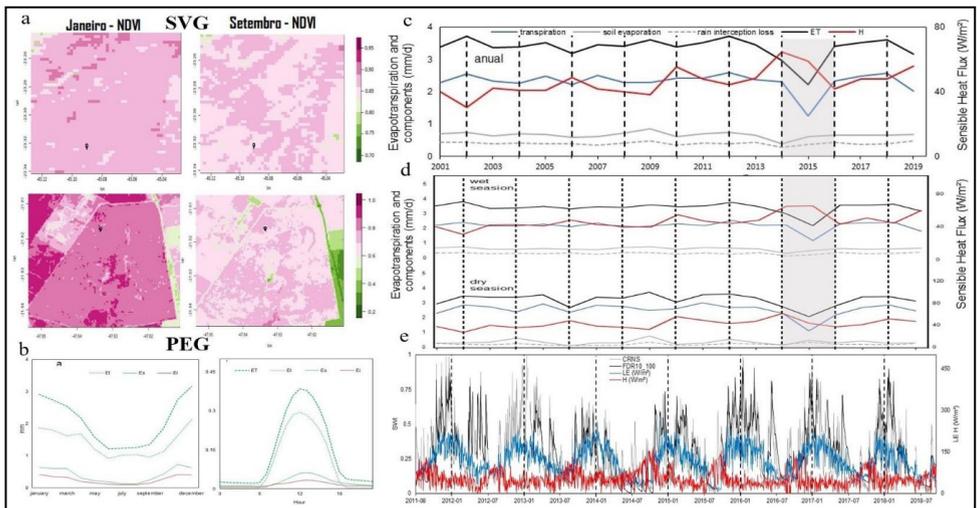


Figura 6. Estimativa nas estações experimentais PEG (Cerrado) e SVG (Mata Atlântica): (a) NDVI sazonal SVG (topo) e PEG (abaixo), (b) ciclo mensal médio e diário da ET e suas componentes no PEG, (c) média mensal dos fluxos de calor sensível e ET no PEG, (d) id. no período seco e chuvoso, (e) id. base diária. Fonte: Conceição et al (2023), Conceição (2023).

O modelo separa a ET em três componentes, incluindo transpiração, evaporação do solo e perda por interceptação da chuva, respectivamente. Para o cerrado, a média da transpiração correspondeu a maior contribuição de 68% de ET (Figura 6b), enquanto a evaporação do solo e a interceptação representaram 20% e 12%, respectivamente. Em termos da variação sazonal, a partição destas componentes é semelhante à média anual na estação chuvosa, porém na estação seca há redução da evaporação do solo (11%) e da perda por interceptação (7,5%), enquanto a transpiração (81%) aumenta.

No Cerrado o padrão dos fluxos sensível e latente apresentaram sazonalidade, com fase e amplitudes diferentes, sendo o calor latente maior no verão, concorrente com a energia solar, e o calor sensível maior no inverno ao final da estação seca (geralmente em agosto). Na variabilidade interanual houve uma quebra no padrão temporal dos fluxos de calor sensível e latente no ano de 2014 (Figura 6e), em decorrência da seca (prolongada até 2015), com queda dos fluxos de calor latente e aumento do calor sensível na estação seca de 2014 e 2015. A Tabela 1 apresenta a síntese das medições realizadas nas estações experimentais PEG (Cerrado) e SVG (Mata Atlântica).

Tabela 1. Médias dos fluxos turbulentos nas estações PEG (Cerrado) e SVG (Mata Atlântica).

		PRECIPITAÇÃO	LE (W/m ²)	H (W/m ²)	ET (mm/d)
Anual (mm/ano)	PEG	1309	100,4	46,1	3,4
	SVG	1957	122,0	60,3	4,2
Estação chuvosa (mm)	PEG	1108	117,0	47,1	4,0
	SVG	2048	133,2	65,0	4,5
Estação seca (mm)	PEG	128	67,8	44,0	2,2
	SVG	797	97,9	49,9	3,3

O sítio experimental de pastagem está na bacia das Posses (PO), Extrema, MG, investigado nos intervalos 2017/2018 e 2020/2021, com medições micro-meteorológicas, e hidrológicas na foz (12 km² de área de contribuição) e em 4 sub-bacias (Q1, Q2, Q3 e Q4). A região de PO tem precipitação média de 1500 mm ano⁻¹ e temperatura média anual de 18,4°C. A cobertura da superfície é

composta principalmente por pastagem (aproximadamente 60% da área) e o restante como pequenos talhões de eucalipto, áreas de restauração florestal e fragmentos de Mata Atlântica (Chittolina, 2022).

Para as medições foi utilizada uma complexa rede de multi-instrumentação, com precipitação, vazão e estimativas de escoamento básico e escoamento direto, umidade do solo, nível do aquífero, ET com métodos micrometeorológicos (Eddy Covariance e Razão de Bowen, com correções de fechamento de balanço de energia e modelagem baseada no balanço hídrico. Na análise temporal hidrológica, o coeficiente de escoamento médio variou de 23 a 37% entre as bacias e o escoamento básico respondeu pela maior parte da vazão durante a estação seca, e cerca de metade nos meses mais úmidos (de 62% a 75%), atingindo picos em março, altamente covariado com o a resposta do lençol freático.

Todas as bacias apresentaram limiares de resposta ao escoamento direto, que só se ocorreu acima de limiares bem definidos, para a precipitação de aproximadamente 10 mm por evento, e umidade do solo de $\approx 45\%$ a 57%, e do nível do aquífero de ≈ 135 cm (Figura 7) (Chittolina *et al.*, 2023).

A ET média anual estimada para PO foi de 2,8 mm d⁻¹, mostrando uma variabilidade sazonal entre $\approx 1,3$ mm dia⁻¹, em julho, e altos fluxos na estação chuvosa (durante cerca de 5 meses) de $\approx 3,5$ mm dia⁻¹ (Figura 8). O índice evaporativo médio anual em todas as bacias foi mais bem estimado, variando de $\approx 59\%$ a 80% da precipitação.

Em paralelo às medições de ET e vazão nas microbacias, investigamos em Extrema os padrões hidrológicos do regime de vazão de um conjunto de 39 nascentes com medidas diretas em áreas de surgência, de forma a auxiliar a estimativa do balanço hidrológico e da ET para as nascentes, no intervalo de 2016 a 2019 (Josef, 2020; Josef *et al.* 2023). Essas séries históricas foram desagregadas para a resolução diária, utilizando-se métodos estatísticos de regressão linear múltipla e análise de componentes principais, contando com medições de nível do aquífero e precipitação diária como variáveis preditoras.

O regime de vazão das nascentes mostrou características sazonais, sem exceção para todas as nascentes, com estimativas da vazão média anual distribuídas em um intervalo de variação bastante amplo, entre ≈ 0.001 a 10 Ls⁻¹, sob distribuição unimodal, que respondeu por mais de 80% de ocorrência entre 0.1

e 10 L s^{-1} , e na vazão específica com uma distribuição semelhantes, que variou predominantemente entre 0.1 e 5 mm dia^{-1} .

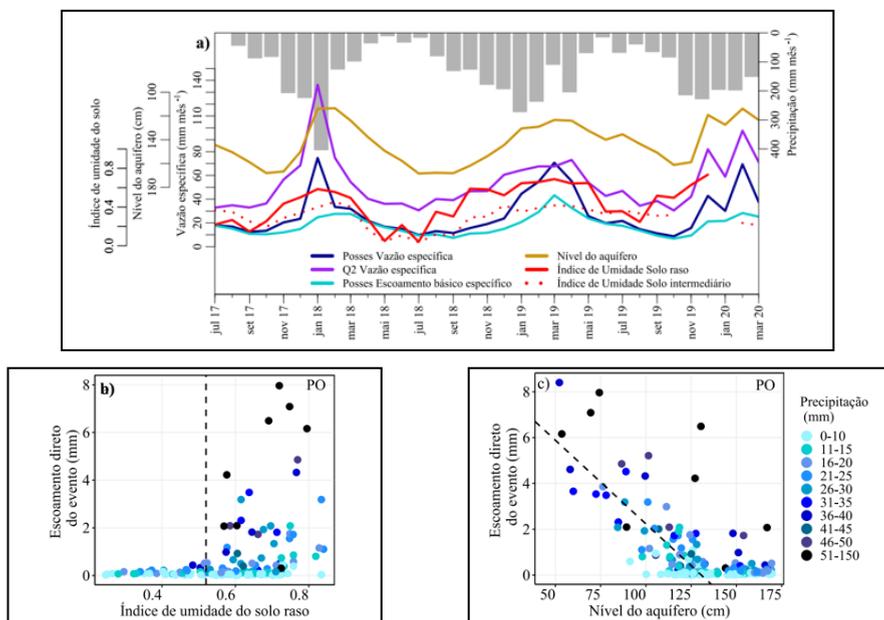


Figura 7. (a) Relação entre precipitação (mm mês^{-1}), vazão específica (mm mês^{-1}) para a bacia do Posses e para bacia Q2, escoamento básico específico (mm mês^{-1}), nível do aquífero (cm) e Índice de umidade do solo raso e intermediário; relação entre escoamento direto (mm evento⁻¹) e (b) índice de umidade de solo raso; e (c) nível do aquífero (cm); **Fonte:** Chittolina *et al.* (2023).

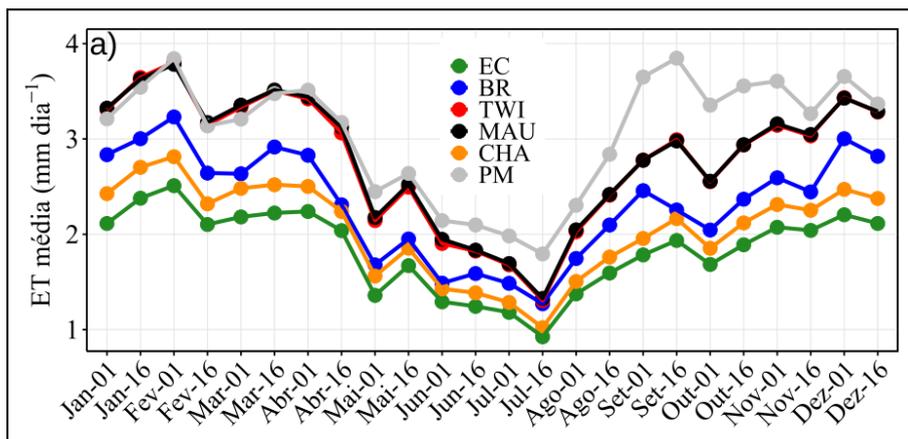


Figura 8. Média de 15 dias de estimativas de ET para os diferentes métodos micrometeorológicos: EC, CHA, BR, TWI, MAU e PM. **Fonte:** Chittolina *et al.* (2023).

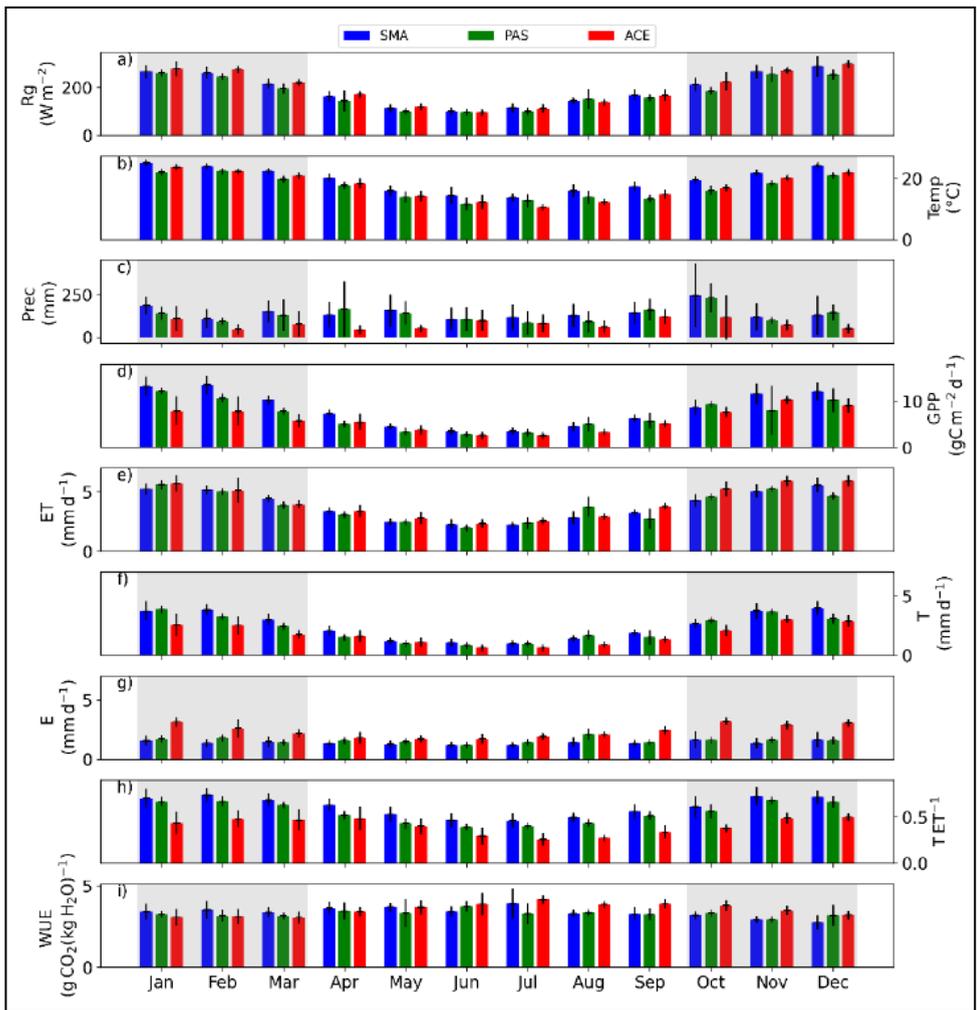


Figura 9. Ciclo médio anual mensal e o desvio padrão para as variáveis radiação global (Rg), temperatura do ar (Temp), precipitação (Prec), assimilação de carbono pela fotossíntese (GPP), (ET), evaporação (E), transpiração (T), relação T ET⁻¹ e uso eficiente da água (WUE). As áreas destacadas em cinza representam as estações de primavera e verão.

O padrão de ET das pastagens nativas do bioma Pampa, no Rio Grande do Sul, foi descrito mediante medidas realizadas em três sítios experimentais com torres de fluxo. Para tanto foram monitoradas áreas naturais nos municípios de Santa Maria (SMA), Pedras Altas (PAS) e em Acegua (ACE). Os valores

médios mensais das variáveis atmosféricas radiação global, temperatura do ar e precipitação, assimilação de carbono pela fotossíntese, ET, evaporação (E), transpiração (T), $T ET^{-1}$ e uso eficiente da água são apresentadas na Figura 9. A ET diária média anual na região variou entre 4,81 e 5,93 mm dia⁻¹, com valores entre 44% e 67 % maiores na primavera e verão do que no outono e no inverno. A ET foi particionada em evaporação e transpiração, a partir do uso eficiente da água.

Embora, durante as estações de primavera/verão, a transpiração tenha comandado o processo de ET, a relação entre $T ET^{-1}$ anual variou entre 41% e 67%. A precipitação mostrou uma forte influência sobre o padrão de evaporação e transpiração; sendo que anos com maiores índices pluviométricos apresentaram maior evaporação, enquanto nos anos mais secos, observou-se menores valores de evaporação. Em ACE, o processo de evaporação foi dominante na ET, enquanto nos demais sítios a componente transpiração foi preponderante. A radiação solar foi a variável com maior correlação tanto em escala diária quanto anual com a transpiração.

O projeto CAPES-ANA permitiu a continuidade da coleta de longo prazo da ET no sítio experimental SMA, localizado na região central do estado do Rio Grande do Sul, sobre sistema de produção pecuária em pastagem natural no Bioma Pampa Brasileiro.

As coletas nesse sítio iniciaram em 2014 e, portanto, foram testemunhas de diversos fenômenos climáticos atuando na região, tais como ocorrência de eventos ENOS, nos quais eventos de El Nino atuam no aumento da precipitação, enquanto eventos La Nina diminuem os volumes acumulados de precipitação. Analisando a influência do El Nino e La Nina na ET observou-se que nos períodos de El Nino, tanto a ET real quanto a de referência (ET_0) diminuem, enquanto nos períodos de La Nina verificou-se que ambas são moderadas.

Esse resultado tem impacto importante para o entendimento dos processos de ET nestes eventos climáticos, já que em períodos com maior disponibilidade hídrica como no El Nino seria esperado maior valores de ET, mas a demanda evaporativa nestes períodos diminui. Em período de La Nina forte os valores de ET real de referência também são menores que nos períodos normais, impactando assim a disponibilidade hídrica e as atividades agrícolas.

FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS E PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Foram concluídas 11 dissertações de mestrado, 11 teses de doutorado, treinamento de 3 Pós-doutorados, 3 monografias de iniciação científica e 6 trabalhos de conclusão de curso. Em relação à produção científica e tecnológica foram 33 artigos científicos publicados em revistas científicas e 2 submetidos, 1 capítulo de livro além de diversos outros produtos relacionados ao projeto.

I. FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

MESTRADO

RICHARD LOBATO. Variabilidade dos fluxos de energia e evapotranspiração sob influência do ENOS no bioma pampa brasileira. 2022. UFSM.
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26377>

LUCAS AUGUSTO FAGUNDES. Estimativa das componentes da equação do balanço de radiação utilizando o modelo sebal. 2019. UFSM.
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/22350>

TIAGO BREMM. Análise dos fluxos de CO₂ em diferentes tipos de manejo pastoril no bioma pampa. 2020. UFSM.
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/17164>

IZABELLA OLIVEIRA DA COSTA. Hidroclimatologia de sub-bacias do Rio Paraíba do Sul com medições de campo e satélite. 2022. USP.

EDUARDO FERNANDES HENRIQUES. Padrões hidroclimatológicos de bacias de mesoescala em São Paulo. 2020. USP
<https://doi.org/10.11606/D.14.2020.tde-18042020-094417>

JONATHAN WENDELL ALVES. VARIABILIDADE HIDROCLIMATOLÓGICA EM ESCALA DE BACIA NO SUDESTE DO BRASIL. USP.

LEONARDO LAIPELT DOS SANTOS. Impactos do desmatamento e das mudanças climáticas na evapotranspiração da Amazônia. 2023. IPH UFRGS.

JULIA BRUSSO ROSSI. Estimativas de evapotranspiração em reservatórios no Brasil por sensoriamento remoto. 2023. IPH UFRGS.
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/262633>

FERNANDO BASQUIROTO DE SOUZA. Downscaling de imagens MODIS e LANDSAT para estimativas de evapotranspiração em alta resolução espacial e temporal. 2022. IPH UFRGS.
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/256804>

ELISA DE MELLO KICH. Calibração automática do modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto (SEBAL). 2018. IPH UFRGS.
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189163>

EDSON MAURICIO MARQUES FERRARI. Análise dos impactos das mudanças de uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos da bacia do rio Araguaia. 2021. INPE.
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46FMG4S>

DOCTORADO

GUSTAVO PUJOL VEECK. Considerações biofísicas da interação superfície e atmosfera em agricultura e pecuária no estado do RS. 2023. UFSM

TAMIRES ZIMMER. Characterization of soil thermal dynamics in natural pasture over the Brazilian pampa biome: estimates of soil thermal properties. 2022. UFSM.
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26042>

LEUGIM CORTEZE ROMIO. Aperfeiçoamento de modelos numéricos para estimativa de propriedades térmicas do solo. 2019. UFSM.
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/19581>

MARCELO BORTOLUZZI DIAZ. Análise das componentes dos fluxos superficiais de massa e energia na região sul do Brasil. 2018. UFSM.
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/15118>

LUCAS FERNANDO CARVALHO DA CONCEIÇÃO. Estimativas de balanço hídrico e produtividade em culturas agrícolas no Brasil com modelagem e sensoriamento remoto. USP.

MARIANE CHITTOLINA. Resposta hidrológica de bacias de cabeceira na Serra da Mantiqueira avaliada com multi-instrumentação. 2022. USP
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106132/tde-05102022-201445/pt-br.php>

LEONARDO MORENO DOMINGUES. Impacto hidrológico das mudanças climáticas na bacia do Rio Jaguari do Sistema Cantareira. 2020. USP.
<https://doi.org/10.11606/T.14.2020.tde-01022021-185226>

CARLA FERREIRA JOSEF. Regime hidrológico das nascentes na bacia do Ribeirão das Posses, Extrema, MG. 2020. USP.
<https://doi.org/10.11606/T.106.2020.tde-06092022-121049>

ADRIANA APARECIDA MOREIRA. Water and Energy fluxes in South America: An integrated approach based on remote sensing and flux measurements. 2022. IPH UFRGS.
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/240008>

BRUNO CÉSAR COMINI DE ANDRADE. Multi-scale actual evapotranspiration mapping in South America with remote sensing data and the geeSEBAL model. 2019. IPH UFRGS.
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/263444>

CÁSSIA BROCCA CABALLERO. The dynamics of land use and land cover in Brazil and the impacts on surface-atmosphere interactions." Início: 2019. IPH UFRGS.

PÓS-DOCTORADO

VANESSA DE ARRUDA SOUZA. Integrando medições de fluxo e modelos de sensoriamento remoto para estimativas de evapotranspiração. 2022-2023 IPH UFRGS.

JOSEF, C. F. Desagregação temporal de medições de vazão de nascentes em área do bioma Mata Atlântica com modelos estatísticos. USP.

PONTES, L. M. Avaliação de dados hidrológicos em área na Mata Atlântica, e prospecção de cenários climáticos futuros. USP.

INICIAÇÃO CIENTÍFICA

BERNARDO IVO GOLTZ. Fechamento de falhas em dados meteorológicos utilizando inteligência artificial. 2021-2022. Iniciação científica (Graduação em Engenharia Elétrica). UFSM.

JOÃO ANTONIO VOLTZ DA SILVA. Wavelet para análises temporais de fluxos turbulentos. 2021-2022. Iniciação científica. UFSM.

DEBORA DA SILVA. Evapotranspiração obtido pelo método *Eddy Covariance* em cultivo de Soja. Início: 2020-2021. Iniciação científica. UFSM.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DÉBORA CARBONELL MARTINS STOLZMANN. Caracterização dos eventos de seca no Rio Grande do Sul e impactos na produção agrícola. 2022. IPH UFRGS.

ALINE DA SILVA ZANINI. Avaliação do impacto da silvicultura na disponibilidade hídrica da bacia do Alto Jequitinhonha (MG). 2022. IPH UFRGS.

GABRIELE LEÃO CYGANSKI. Avaliação de modelos globais e fusão de dados de evapotranspiração na América do Sul. 2021. IPH UFRGS.

<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/235272>

LEONARDO LAIPELT DOS SANTOS. geeSEBAL: Uma ferramenta Google Earth Engine para estimativas de series temporais de evapotranspiração. 2020. IPH UFRGS.

<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219375>

JULIA BRUSSO ROSSI. Representação de eventos de seca no Brasil por produtos de sensoriamento remoto. 2020. IPH UFRGS.

<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/219715>

PAULA SULZBACH RILHO. Identificação de taxas de evapotranspiração por sensoriamento remoto em diferentes cultivos agrícolas no estado do Rio Grande do Sul. 2018. IPH UFRGS.

<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/194853>

II PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

ARTIGOS CIENTÍFICOS

ZIMMER, T.; et al. Estimation of soil thermal properties using conduction and conduction-convection heat transfer equations in the Brazilian Pampa biome. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 338, p. 109517, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109517>

MOREIRA, V. S.; et al. Impacts of climate change on water fluxes and soybean growth in southern Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, v. 54, p. e20228398, 2023.

<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230014>

RUBERT, G. C.; et al. Patterns and Controls of the Latent and Sensible Heat Fluxes in the Brazilian Pampa Biome. *Atmosphere*, v. 13, p. 23, 2022.

<https://doi.org/10.3390/atmos13010023>

KÄFER, P. S.; et al. Assessing uncertainties in estimating surface energy fluxes from remote sensing over natural grasslands in Brazil. *Theoretical And Applied Climatology*, v. 148, p. 751-765, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03869-6>

ROMIO, L. C.; et al. Influence of Different Methods to Estimate the Soil Thermal Properties from Experimental Dataset. *Land*, v. 11, p. 1960, 2022.

<https://doi.org/10.3390/land11111960>

AIMI, D.; et al. Evaluation of Atmospheric Downward Longwave Radiation in the Brazilian Pampa Region. *Atmosphere*, v. 12, p. 28, 2021.

<https://doi.org/10.3390/atmos12010028>

- ZIMMER, T.; *et al.* Influence of clearness index and soil moisture in the soil thermal dynamic in natural pasture in the Brazilian Pampa biome. *Geoderma*, v. 378, p. 114582, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114582>
- KAFER, P. S.; *et al.* Artificial neural networks model based on remote sensing to retrieve evapotranspiration over the Brazilian Pampa. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 14, p. 038504, 2020.
<https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.038504>
- ROCHA, N. S.; *et al.* The Influence of Land Surface Temperature in Evapotranspiration Estimated by the S-SEBI Model. *Atmosphere*, v. 11, p. 1059, 2020.
<https://doi.org/10.3390/atmos11101059>
- DIAZ, M. B.; *et al.* Dynamics of the superficial fluxes over a flooded rice paddy in southern Brazil. *Agricultural And Forest Meteorology*, v. 276-277, p. 107650, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107650>
- ROMIO, L. C.; *et al.* A Numerical Model to Estimate the Soil Thermal Conductivity Using Field Experimental Data. *Applied Sciences-Basel*, v. 22, p. 4799, 2019.
<https://doi.org/10.3390/app9224799>
- RUBERT, G. C.; *et al.* Evapotranspiration of the Brazilian Pampa Biome: Seasonality and Influential Factors. *Water*, v. 10, p. 1864, 2018.
<https://doi.org/10.3390/w10121864>
- CHITTOLINA, M.; *et al.* Hydrological response of a headwater catchment in Southeast Brazil – Threshold patterns of stormflow response. *Hydrological Processes*, 37(5), e14879. 2023.
<https://doi.org/10.1002/hyp.14879>
- DOMINGUES, L. M.; *et al.* Serial droughts and loss of hydrologic resilience in a subtropical basin: The case of water inflow into the Cantareira reservoir system in Brazil during 2013-2021. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 44, p. 101235, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101235>
- BAKER, J. C. A.; *et al.* Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, p. 2279-2300, 2021.
<https://doi.org/10.5194/hess-25-2279-2021>
- TAN, Z. H.; *et al.* Surface conductance for evapotranspiration of tropical forests: Calculations, variations, and controls. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 275, p. 317-328, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.06.006>

CONCEIÇÃO, L. C.; et al. Interannual variability of water and heat fluxes in a woodland savanna (Cerrado) in southeast Brazil: effects of drought and soil moisture (submitted to Agricultural and Forest Meteorology 2023).

JOSEF, C. F.; et al. Characterization of water balance in a cluster of springs in the Atlantic Forest biome (submitted to Hydrological Processes, 2023).

MOREIRA, A. A.; et al. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *Journal of Hydrology*, p. 131-147, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>

SOUZA, V. A.; et al. Evaluation of MOD16 Algorithm over Irrigated Rice Paddy Using Flux Tower Measurements in Southern Brazil. *Water*, v. 11, p. 1911, 2019.
<https://doi.org/10.3390/w11091911>

MOREIRA, A. A.; et al. Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM em sítios de fluxos turbulentos do Programa LBA. *Ciência e Natura*, v. 40, p. 112, 2018.
<https://doi.org/10.5902/2179460X30714>

LAIPELT, L. S.; et al. Assessment of an Automated Calibration of the SEBAL Algorithm to Estimate Dry-Season Surface-Energy Partitioning in a Forest-Savanna Transition in Brazil. *Remote Sensing*, v. 12, p. 1108, 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12071108>

ANDRADE, B. C. C.; et al. Artificial neural network model of soil heat flux over multiple land covers in South America. *Remote Sensing*, v. 13, p. 2337, 2021.
<https://doi.org/10.3390/rs13122337>

LAIPELT, L. S.; et al. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 178, p. 81-96, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>

ANDRADE, B. C. C.; et al. Remote sensing-based actual evapotranspiration assessment in a data-scarce area of Brazil: A case study of the Urucuia Aquifer System. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 1, p. 102298, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102298>

GONÇALVES, I. Z.; et al. Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation management in Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 274, p. 107965, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107965>

RUHOFF, A.; et al. Global Evapotranspiration Datasets Assessment Using Water Balance in South America. *Remote Sensing*, v. 14, p. 2526, 2022.
<https://doi.org/10.3390/rs14112526>

- CABALLERO, C. B.; et al.** Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Science of the Total Environment*, v. 808, p. 152134, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>
- RUBERT, G. C. D.; et al.** Patterns and Controls of the Latent and Sensible Heat Fluxes in the Brazilian Pampa Biome. *Atmosphere*, v. 13, p. 23, 2022.
<https://doi.org/10.3390/atmos13010023>
- KAYSER, R. H. B.; et al.** Assessing geeSEBAL automated calibration and meteorological reanalysis uncertainties to estimate evapotranspiration in subtropical humid climates. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 314, p. 108775-108791, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108775>
- ROSSI, J. B.; et al.** Drought propagation in Brazilian biomes revealed by remote sensing. *Remote Sensing*, v. 15, p. 454, 2023.
<https://doi.org/10.3390/rs15020454>
- COMINI, B.; et al.** geeSEBAL-MODIS: Continental scale evapotranspiration based on the surface energy balance for South America. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17579.11041>
- SOUZA, F. B.; et al.** A MODIS-Landsat cloud-based spatiotemporal downscaling algorithm to estimate land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 2023.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2238327>
- CABALLERO, C. B.; et al.** Transformation of Brazil's biomes: The dynamics and fate of agriculture and pasture expansion into native vegetation. *Science of the Total Environment*. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166323>
- ROSSI, J. B.; et al.** How much evaporation occurs in Brazilian reservoirs? A remote sensing perspective. *Journal of Hydrology*. 2023.

CAPÍTULO DE LIVRO

- ROBERTI, D. R.; et al.** *Interação entre os agroecossistemas e a atmosfera. Resultados Comparativos de 32 anos dos sistemas Plantio Direto e Convencional.* Porto Alegre: SESCOOP RS, v. 1, p. 177-204. 2019.

OUTROS PRODUTOS RELACIONADOS AO PROJETO

EVAPOTRANSPIRAÇÃO dos ecossistemas e uso eficiente da água. Apresentação em Feiras agropecuárias do RS, Expointer, Universo Pecuária 2022, Expodireto 2023.

APLICATIVO GEESEBAL para estimativa de evapotranspiração a partir da combinação de imagens Landsat coleção 2 e dados meteorológicos de reanálise ERA5-Land.

<https://etbrasil.users.earthengine.app/view/geesebal>

ATUALIZAÇÃO DO MODELO SSEBOP para utilização com imagens Landsat coleção 2 e dados meteorológicos de reanálise ERA5-Land.

<https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebopbrv2>

REPOSITÓRIO COM DISPONIBILIDADE DOS CÓDIGOS DO GEESEBAL em linguagem de programação Python para estimativa de evapotranspiração a partir da combinação de imagens Landsat e dados meteorológicos de reanálise ERA5-Land.

<https://github.com/et-brasil/geeSEBAL>

BASE DE DADOS de evapotranspiração para a América do Sul com base em dados do sensor MODIS Aqua para o período 2000-2023.

Google Earth Engine snippet: *ee.ImageCollection ('projects/et-brasil/assets/geesebal/myd11a2/sa/v0-02')*

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A visão e o planejamento integrados das questões que exigem análises hidrológicas com a gestão dos recursos hídricos exigem uma grande disponibilidade e acurácia de informações de superfície, desde as escalas locais até as regionais. Esta demanda é impulsionada pela crescente disponibilidade de medições de campo, e pelos avanços no aperfeiçoamento e operação de sistemas de modelagem hidrológica, que se beneficiam de novos sensores remotos e melhor capacidade da manipulação de grandes quantidades de dados. Destacamos inicialmente a consolidação de um conjunto de medições do balanço de energia e especialmente da ET pelo método da covariância de vórtices turbulentos, com correção de viés do fechamento do balanço de energia, e de componentes do balanço hídrico em escala de bacia (umidade do solo, vazão, precipitação), utilizados para validação das estimativas de ET e do estresse hídrico. Destacamos finalmente a construção e disponibilização de um modelo de ET denominado geeSEBAL, utilizado com informações de satélite e dados

meteorológicos de reanálise ERA5-Land, para geração de series temporais desde 1984 e 2000, respectivamente, com grande acurácia e capacidade de detecção de mudanças de uso e cobertura da terra. E destacamos o aprimoramento de outros modelos, como o modelo de ET denominado SSEBOP, e o modelo de ET, estresse hídrico e produtividade denominado SiB2. Todos estes modelos em geral utilizam as informações do Landsat e MODIS como condição de contorno, e as forçantes meteorológicas como dados de medição local ou de reanálise como o ERA5-Land, para estimar a ET desde a escala horária ou diária até outras maiores. Os modelos mostram marcante sensibilidade de representação de cobertura de superfície (solo/vegetação), que permite o monitoramento de uso da água em agricultura irrigada e agricultura de sequeiro, e áreas de vegetação natural. As estimativas de ET baseadas em multimodelos indicam superioridade à utilização de modelos individuais. Essas condições de disponibilidade de ferramentas e informações possibilitam, aos órgãos gestores da água, o aperfeiçoamento do monitoramento do uso dos recursos hídricos do Brasil, com benefícios para a gestão da regulação, fiscalização e planejamento.

PERSPECTIVAS

Destacamos que a implementação operacional de modelos de ET e balanço hídrico pode ser consolidada sob um alto nível de embasamento científico, provendo resultados de alta acurácia, a partir da existência de informações micrometeorológicas e hidrológicas de campo, como medições de ET e de componentes do balanço hídrico, que viabilizem a calibração e validação dos esquemas físico-numérico computacionais. As etapas de consolidação destas informações exigem um esforço humano-institucional e custo social muito alto, que cobrem desde as etapas de conceituação teórica, levantamento de recursos financeiros, formação e agregação de especialistas técnicos e pós-graduandos, escolha de sítio experimental e colaborações interinstitucionais com setores público e privado, instalação e manutenção do funcionamento da instrumentação, pós-processamento dos dados, análise científica, e publicação em periódicos de alta qualidade. Nas perspectivas espera-se dar continuidade às questões do projeto,

em parceria com a ANA, para mobilizar a melhor capacidade possível do estado brasileiro na utilização de modelagem com fins de suporte à gestão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2020) Estimativas de Evapotranspiração Real por Sensoriamento Remoto. Brasília: ANA, p. 110.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2021) **Atlas Irrigação 2021: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: ANA.

ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G.; MORSE, A.; KUSTAS, W. P. (2012) Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**.

ANDRADE, B. C. C.; *et al.* (2023) geeSEBAL-MODIS: Continental scale evapotranspiration based on the surface energy balance for South America. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**.

ARAÚJO, R. S.; ALVES, M. G.; MELO, M. T. C.; *et al.* (2015) **Water resource management: A comparative evaluation of Brazil, Rio de Janeiro, the European Union, and Portugal**. Science of the Total Environment.

BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. (1998) The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 – **Formulation**. **Journal of Hydrology**.

BIGGS, T.; *et al.* (2015) Remote Sensing of Actual Evapotranspiration from Cropland: Chapter 3. *In*: Thenkabail, P. S. (2015) **Remote sensing handbook**, Vol. III: Remote sensing of water resources, disasters, and urban studies. CRC Press.

LATHULLIÈRE, M. J.; *et al.* (2018) Rain-fed and irrigated cropland-atmosphere water fluxes and their implications for agricultural production in Southern Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**.

LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.; *et al.* (2015) Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. **Water Resources Research**.

MELTON, F. S. *et al.* (2022). OpenET: Filling a Critical Data Gap in Water Management for the Western United States. **Journal of the American Water Resources Association**.

SENAY, G. B.; *et al.* (2023) Improving the Operational Simplified Surface Energy Balance Evapotranspiration Model Using the Forcing and Normalizing Operation. **Remote Sensing**.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; et al. (2013) Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**.

UNITED NATIONS WATER (2010) **Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water**. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/climate-change-adaptation-pivotal-role-water>.