

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

FELIPE CAVALLINI CRESPO

**DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO EVAPOTRANSPIRATIVO  
NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

PORTO ALEGRE

2022

FELIPE CAVALLINI CRESPO

**DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO EVAPOTRANSPIRATIVO  
NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

**Orientador:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Denise Cybis Fontana

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Crespo, Felipe Cavallini  
DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO  
EVAPOTRANSPIRATIVO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL /  
Felipe Cavallini Crespo. -- 2022.  
86 f.  
Orientadora: Denise Cybis Fontana.

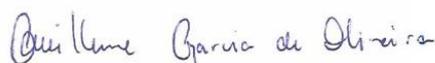
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em  
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de  
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,  
BR-RS, 2022.

1. Evapotranspiração. 2. Fluxo de calor latente. 3.  
modelo. 4. MODIS. 5. ENOS. I. Fontana, Denise Cybis,  
orient. II. Título.

## ATESTADO

Atestamos que **Felipe Cavallini Crespo** defendeu na data de hoje, em sessão pública, a Dissertação de Mestrado intitulada “**DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO EVAPOTRANSPIRATIVO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**”, perante Banca Examinadora composta pelos professores: **Dra. Tatiana Mora Kuplich** (PPGSR/UFRGS), **Dr. Anderson Ruhoff** (IPH/UFRGS), **Dra. Debora Regina Robert** (UFSM) e **Dra. Bernadete Radin** – Suplente (UFRGS), sendo presidida pelo(a) orientador(a) Profa. Dra Denise Cybis Fontana, fazendo jus ao título de “**Mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**”, conferido por este Programa de Pós-Graduação, habilitando-se ao Diploma correspondente após processo de homologação.

Porto Alegre, 30 de setembro de 2022.



Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira  
Coordenador  
PPG Sensoriamento Remoto/UFRGS

Dedico este trabalho as minhas avós Alice Pires Cavallini e Adosinda Pires de Oliveira que infelizmente não puderam ver este trabalho concluído, mas que continuam sendo fontes de muita força para mim. Aos meus pais Ana Maria Cavallini Crespo e Lucio Manoel de Oliveira Crespo e meu irmão Rodrigo Cavallini Crespo por todo o apoio e incentivo para que eu seguisse firme na realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e ao PPGSR pelo espaço de formação e pelas experiências enriquecedoras.

À minha orientadora Denise Cybis Fontana por ser uma pessoa incrível que além das valiosas contribuições para a minha formação também me apoiou e incentivou durante essa jornada. Com certeza ter tido ela como orientadora fez toda a diferença para eu continuar determinado e focado na minha dissertação mesmo com as dificuldades que surgiram pelo caminho.

Ao meu “Coorientador” Juliano Schirmbeck por toda a ajuda e pelas diversas reuniões até altas horas da madrugada para que fosse possível a elaboração do trabalho.

Ao meu professor e amigo Jean Marcel de Almeida Espinoza, ao qual eu tenho grande apreço e admiração. Obrigado por todos seus ensinamentos, por acreditar em mim e por me guiar pelos caminhos do Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto permitindo que eu crescesse cada vez mais profissionalmente.

Aos meus colegas de curso principalmente ao Marco Antonio de Oliveira pelo fundamental apoio antes mesmo do começo dessa longa jornada, e durante ela que junto ao Samuel Gameiro foram grandes amigos que tornaram o dia a dia mais leve, divertido e cheio de bons momentos. E a minha colega Grazieli Rodigheri que junto a equipe do LEAA me auxiliaram nas pesquisas e em diversas questões acadêmicas compartilhando conhecimentos.

Aos meus familiares que mesmo longe estiveram constantemente em contato comigo, compreenderam a importância deste trabalho em minha vida, apoiaram minhas escolhas e fizeram tudo que puderam para que eu alcançasse, e continue alcançando, meus objetivos. “Cheguei e tá tudo bem”!

Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.

Antoine Laurent Lavoisier

## RESUMO

O principal fator que limita a obtenção de maiores produtividades no Estado é a deficiência hídrica, variável muito estudada, mas que apresenta carências de aprofundamento especialmente no que se refere ao detalhamento espacial desta informação. O presente trabalho teve como objetivo caracterizar com maior grau de detalhamento a variabilidade espaço-temporal do fluxo evapotranspirativo (LE) no Rio Grande do Sul. Os dados de LE foram obtidos através do modelo METRIC, com dados de entrada provenientes do sensor MODIS e do projeto ERA 5, para o período de 2002 a 2019. A partir desse banco de dados, foram extraídas médias anuais e mensais para representação de um ano médio abrangendo o período dos 18 anos (ano padrão e meses padrões, respectivamente). Também foram analisadas as médias e a variabilidade em torno da média para os dados mensais e anuais e verificado a existência de diferenças significativas entre regiões ecoclimáticas e meses do ano. Sabendo dos significativos efeitos do El Niño Oscilação Sul no Estado, averiguou-se a variabilidade de LE frente a eventos do fenômeno. Visando descrever o padrão dos dados, espaço-temporalmente, foram elaborados mapas, assim como diagramas de caixa. Os resultados apontaram uma importante variação espacial do fluxo evapotranspirativo no sentido Leste-Oeste do RS, com maiores valores a Leste e menores a Oeste. Verificou-se, também uma marcada sazonalidade, com maior LE durante o verão e menor no inverno. O padrão observado mostra coerência com as características climáticas do Estado e, também, com fatores como altitude, uso e cobertura do solo e tipo de solo. Foram identificados quatro grupos com Regiões Ecoclimáticas que apresentam características similares quanto ao fluxo evapotranspirativo. Frente ao ENOS, os resultados apontaram que a fase de La Niña apresenta maiores valores de LE quando comparado ao El Niño, em todas as regiões ecoclimáticas.

**Palavras-chave:** Modelo. MODIS. ERA5. LE.

## ABSTRACT

Rio Grande do Sul still needs more detailed spatial information about the water condition in the state. That is the main reason that limits the achievement of higher productivity in the State. This study aimed to characterize with a more accurate spatiotemporal detail the evapotranspiration flow (LE) in Rio Grande do Sul. LE data was obtained through the METRIC model with input data from the MODIS sensor and the ERA 5 project covering the period between 2002 and 2019. From this database, annual and monthly averages were generated for the period of 18 years (standard year and standard months, respectively). The averages and the variability around the average for the monthly and annual data were also analyzed and the relationship between the ecoclimatic regions and the months of the year were statistically verified. To complement the study, the LE variability was investigated in the occurrence of events of the El Niño Southern Oscillation phenomenon. To describe the spatiotemporal pattern of the data, representative maps were used, as well as histograms and box-plots. The results showed an important spatial variation in the evapotranspiration flow in the East-West direction of RS, with higher rates in the East and lower in the West. A strong seasonality was exhibit with higher LE during the summer and lower in the winter. This observed pattern is consistent with the climatic characteristics of the State and also with factors such as altitude, land use and cover and soil type. Four groups of ecoclimatic regions with similar evapotranspiration flow characteristics were statistically determined. Associated to ENSO, the results indicated that the La Niña phase presents higher values of LE than El Niño in all ecoclimatic regions.

**Keywords:** Model. MODIS. ERA5. LE.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação das fases do fenômeno ENOS.....	25
Figura 2 – Índice Niño Oceânico (ONI).....	26
Figura 3 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	27
Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo.....	29
Figura 5 – Mapa de precipitação pluviométrica média anual no RS.....	30
Figura 6 – Mapa da Evapotranspiração Potencial média anual no RS.....	30
Figura 7 – Classificação climática de Köppen para o RS.....	31
Figura 8 – Mapa do RS a) Geomorfologia e b) Altitude.....	33
Figura 9 – Mapa de Uso e Cobertura da terra do RS a) 2000 e b) 2018.....	34

### Artigo 1

Figura 1 – Área de estudo: o estado do RS com a) divisão das regiões Ecoclimáticas, b) Cobertura e Uso da terra, e c) Altitude.....	41
Figura 2 – Mapa do Fluxo evapotranspirativo ( $LE, W.m^{-2}$ ) no Rio Grande do Sul, médias do período 2002 – 2019.....	46
Figura 3 – Mapas médios mensais de $LE (W.m^{-2})$ no período 2002 – 2019 no Rio Grande do Sul.....	49
Figura 4 – Mapa do Coeficiente de variação dos valores de $LE$ no Rio Grande do Sul, período 2002 – 2019.....	50
Figura 5 – Diagramas de Caixa (Box-Plots) mensais de $LE$ para as Regiões Ecoclimáticas (a) Alto Valer do Uruguai, (b) Baixo Vale do Uruguai, (c) Campanha, (d) Depressão Central, (e) Encosta Inferior Serra do Nordeste, (f) Litoral, (g) Missioneira, (h) Planalto Médio, (i) Planalto Superior Serra do Nordeste, (j) Região dos Grandes Lagos, (k) Serra do Sudeste, e para o Estado (l) Rio Grande do Sul, no período 2002 – 2019.....	52
Figura 6 – Análise de agrupamento das Regiões Ecoclimáticas quanto à variabilidade em $LE (W.m^{-2})$ , no período de 2002 – 2019.....	56
Figura 7 – Representação das Regiões Ecoclimáticas nos agrupamentos formados pela análise de clusters.....	57

Figura 8 – Variabilidade ao longo do ano em LE ( $W.m^{-2}$ ) para os quatro grupos de Regiões Ecoclimáticas similares.....	56
---	----

## Artigo 2

Figura 1 – Área de estudo: RS e regiões Ecoclimáticas.....	65
Figura 2 – Índice Oceânico Niño (ONI), com as ocorrências de eventos El Niño (em vermelho), La Niña (em azul) no período de 2002 a 2019.....	67
Figura 3 – Mapa do Rio Grande do Sul com valores médios do fluxo evapotranspirativo (LE) para o trimestre outubro/novembro/dezembro no evento para: (a) La Niña de 2010/2011 e (b) El Niño de 2015/2016.....	68
Figura 4 – Diagrama de caixas do fluxo evapotranspirativo ( $LE - W.m^{-2}$ ) no trimestre Outubro/Novembro/Dezembro para as fases La Niña (2010/2011) e El Niño (2015/2016). A linha horizontal no interior das caixas representa o percentil 50 (mediana), o final das caixas os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e as cruzes em vermelho os valores extremos.....	70
Figura 5 – Diagrama de caixas do fluxo evapotranspirativo ( $LE - W.m^{-2}$ ) no trimestre outubro/novembro/dezembro da La Niña de 2010/2011 e do El Niño de 2015/2016 nas Regiões Ecoclimáticas do Rio Grande do Sul. A linha horizontal no interior das caixas representa o percentil 50 (mediana), o final das caixas os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e as cruzes em vermelho os valores extremos.....	71
Figura 6 – Dados medidos de (a) temperatura do ar, (b) velocidade do vento, (c) precipitação pluvial, (d) umidade relativa do ar, (e) radiação solar global, e (f) evapotranspiração potencial em estações automáticas no Rio Grande do Sul no trimestre outubro/novembro/dezembro da La Niña de 2010/2011 e do El Niño de 2015/2016.....	73

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Comparação entre ERA-Interim e ERA5.....	24
Quadro 2 – Componentes do BE e respectivos produtos MODIS utilizados para suas estimativas.....	36
Quadro 3 – Componentes do BE e respectivos dados ERA5 utilizados para suas estimativas.....	37

### Artigo 1

Tabela 1 – Componentes do BE e respectivos dados utilizados para suas análises.....	44
Tabela 2 – Valores médios das Regiões Ecoclimáticas e do Estado do Rio Grande do Sul em cada mês e no período de 2002 – 2019.....	55
Tabela 3 – Valores médios mensais de LE ( $W.m^{-2}$ ) para os grupos com REs similares quanto à variabilidade em LE, período de 2002 – 2019.....	59

### Artigo 2

Tabela 1 – Dados utilizados no cálculo dos componentes do Balanço de Energia.....	60
Tabela 2 – Valores médios de LE ( $W.m^{-2}$ ) no trimestre Outubro/Novembro/Dezembro para as fases La Niña (2010/2011) e El Niño (2015/2016) nas Regiões Ecoclimáticas do Rio Grande do Sul.....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BE	Balanço de Energia
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ENVI	Environment for Visualizing Images
EOS	Earth Observing System
ERA	ECMWF Re-Analysis
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiração Potencial
ET <sub>r</sub>	Evapotranspiração Real
EVI	Enhanced Vegetation Index
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível no ar
IAF	Índice de Área Foliar
IDL	Interactive Data Language
IDW	Inverse Distance Weighting
LE	Fluxo de calor latente/ evapotranspirativo.
METRIC	Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infra-Red
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ONI	Oceanic Niño Index
RE	Região Ecoclimática
R <sub>n</sub>	Saldo de radiação
RS	Rio Grande do Sul
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SR	Sensoriamento Remoto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Referencial teórico</b> .....	17
2.1.1	Balanço de energia.....	17
2.1.2	Métodos para obter o BE usando imagens de satélite.....	19
2.1.3	Sensor MODIS.....	21
2.1.4	Reanálise.....	23
2.1.5	ENOS.....	24
<b>2.2</b>	<b>Metodologia</b> .....	27
2.2.1	Caracterização da área de estudo.....	28
2.2.2	Estimativa dos componentes do BE.....	34
2.2.3	Dados orbitais.....	36
2.2.4	Dados de reanálises.....	36
<b>2.3</b>	<b>Resultados e discussões</b> .....	38
2.3.1	Artigo 1: Variabilidade espaço-temporal do fluxo evapotranspirativo no RS.....	38
2.3.2	Artigo 2: Efeitos do fenômeno ENOS na variabilidade do fluxo evapotranspirativo no RS.....	63
<b>3</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	76
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto agroeconômico em que o Rio Grande do Sul (RS) se insere é de grande importância a adoção de tecnologias e ferramentas de sensoriamento remoto (SR) que possam, ao gerar informações relacionadas aos riscos associados à atividade agropecuária, contribuir para o desenvolvimento do Estado. Isto ocorre porque a economia do RS está grandemente baseada no setor agropecuário (FEIX; LEUSIN JÚNIOR, 2019), em que condições ou eventos adversos comprometem o bom desenvolvimento das safras. É, portanto, fundamental a geração de informações que sirvam de base para o monitoramento em tempo real, assim como também para o planejamento da atividade agrícola. Neste contexto, tem sido crescente a busca por métodos de predição e caracterização das condições meteorológicas e climáticas de cada região do RS (MATZNAUER; MALUF; RADIN, 2020), de forma a explorar suas potencialidades.

Sabe-se que a agricultura do Rio Grande do Sul é altamente dependente da condição hídrica e que o déficit hídrico é o evento adverso que causa maiores prejuízos para o setor agropecuário. O déficit hídrico é responsável por causar importantes lacunas de produtividade, que poderiam ser evitadas com a implementação de medidas de mitigação, principalmente nos períodos críticos das culturas, nos quais há maior dependência dos recursos hídricos (SENTELHAS et al., 2015). Apesar da importância, o Estado ainda tem muito a explorar de informações com maior detalhamento espacial sobre a condição hídrica nas extensas áreas produtoras de grãos, bem como das pastagens, base para a atividade pecuária. Estas informações podem auxiliar em melhorias nas ferramentas já existentes voltadas ao aumento da produtividade, como por exemplo, o Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos, ou mesmo na proposição de novas possibilidades.

Destaca-se ainda, a necessidade de aprofundar conhecimento sobre a variabilidade da condição hídrica frente a eventos de variabilidade climática, como é o caso do fenômeno do El Niño Oscilação Sul (ENOS). Este fenômeno, de escala global, mostra impactos no clima do RS, gerando importantes alterações no regime hídrico (MATZNAUER et al., 2018), também ainda

carente de um adequado detalhamento espacial do seu impacto no território do RS.

Entre as diversas possibilidades de obter informações sobre a condição hídrica na superfície, destaca-se o balanço de energia (BE), o qual descreve a forma como a energia disponível na superfície é utilizada. Apesar da energia presente na superfície da Terra, na forma de saldo de radiação ( $R_n$ ), ter diversos usos, a maior parte é distribuída entre três componentes principais, sendo eles: fluxo de calor sensível no solo ( $G$ ), fluxo de calor sensível no ar ( $H$ ) e fluxo de calor latente e/ou evapotranspirativo (LE) (BOWEN, 1926, WANG; LI; CRIBB, 2006, TIMMERMANS et al., 2007). Entendendo para quais componentes do BE a energia é utilizada, é possível inferir sobre a condição hídrica da superfície, por meio de análises do componente LE. Este componente, representa a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), definida como a perda de água que ocorre em quaisquer condições de umidade no solo, de tipo e desenvolvimento de plantas e condição de demanda evaporativa da atmosfera, informação cuja disponibilidade é muito escassa na escala de abrangência do RS.

Uma alternativa para estimar os componentes do BE sem ter que realizar medidas *in situ*, é utilizar modelos que trabalhem com dados de entrada provenientes de sensores remotos. Estes, podem ser constituídos de imagens e/ou produtos oriundos de sensores remotos, com grau de processamento avançado, e dados de reanálise meteorológica, que se baseiam na reanálise de dados históricos provenientes de diversas fontes. A vantagem de usar estas bases de dados para fornecer informações sobre os componentes do BE, reside na possibilidade de obter informações, contínuas no tempo, em grande escala de abrangência espacial e também com alto grau de detalhamento espacial (SCHIRMBECK et al., 2017; SCHIRMBECK et al., 2018), sem ser necessário haver gastos elevados e complicações de logística para ir a campo (LEES et al., 2018). Assim, o uso de sensores remotos na estimativa de LE pode atender a demanda de geração de informações com maior detalhamento espacial sobre condição hídrica.

Em termos de modelos que utilizam SR para o cálculo de BE, existem diversas fontes, mas destacam-se o *Surface Energy Balance Algorithm for Land*

(SEBAL) e o *Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration* (METRIC) com bons resultados nas condições de clima subtropical chuvoso que ocorre no estado do Rio Grande do Sul (SCHIRMBECK et al., 2017).

Já em relação a sensores, boa parte dos trabalhos com BE utilizam o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo das plataformas Terra e Aqua. Estas imagens têm sido também de grande auxílio em estudos sobre mudanças globais (alterações no uso do solo, nos oceanos, na atmosfera, etc) de curta ou longa duração. As imagens MODIS tem sido, com certa frequência, usadas como fonte de dados para alimentar os modelos SEBAL e METRIC, dada que a resolução espectral, espacial e temporal são adequadas para representar os processos que ocorrem na superfície.

Outra fonte muito importante de informação, são os dados de reanálise. Através de assimilações e reanálises de dados meteorológicos históricos, é possível obter informação mesmo em locais onde há escassez ou inexistência de dados. À semelhança dos produtos MODIS, também os dados de reanálise possibilitam maior detalhamento espacial do que dados provenientes por exemplo de estações meteorológicas de superfície, também de forma contínua no tempo. O projeto ERA5, versão atualizada do projeto ERA Interim, atualmente uma das maiores fontes de dados de reanálise, fornece uma variedade de dados, como, por exemplo, temperatura do ar, velocidade do vento, temperatura do ponto de orvalho e radiação solar global (BROWNE et al., 2019, HERSBACH et al., 2019). Estes, podem ser úteis como dados de entrada nos modelos de estimativa do BE usando técnicas de SR.

Tendo em vista as vantagens de utilizar dados orbitais e de reanálise, e sabendo da importância e também da carência de informação com maior detalhamento espacial sobre a condição hídrica do Estado, é proposto o presente estudo.

O objetivo deste trabalho foi utilizar o fluxo evapotranspirativo, oriundo do Balanço de Energia usando sensores remotos, para caracterizar e descrever espaço-temporalmente a variabilidade hídrica no território do Estado Rio Grande do Sul de forma mais detalhada do que a atualmente disponível usando dados medidos na superfície, informação esta que é de grande relevância para

minimizar as lacunas de rendimento observadas no setor agropecuário do Estado.

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o padrão médio mensal e anual de LE no Estado do RS e a distribuição espacial;
- Determinar a magnitude da variabilidade de LE no Estado como um todo e as diferenças entre as Regiões Ecoclimáticas;
- Caracterizar a variabilidade no padrão médio de LE frente a eventos do fenômeno do ENOS.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

A dissertação foi dividida em duas partes, a primeira parte apresenta a introdução do tema abordado, o levantamento do referencial teórico que sustenta as ideias trabalhadas ao longo da dissertação sobre o balanço de energia e seus componentes e os diferentes meios de obtê-los através de técnicas de sensoriamento remoto, assim como uma descrição da área de estudo. A segunda parte conta com dois artigos que retomam algumas características da área de estudo e trazem a metodologia aplicada em cada análise realizada, os resultados obtidos e as discussões acerca do assunto. Os artigos em questão são intitulados:

Artigo 1 – “Variabilidade espaço-temporal do Fluxo Evapotranspirativo no RS”.

Artigo 2 - “Efeitos do fenômeno ENOS na dinâmica do Fluxo Evapotranspirativo no RS”.

Por fim, apresenta-se um capítulo de conclusão com as considerações finais discutindo o que foi pesquisado ao longo da dissertação.

## 2.1 Referencial teórico

### 2.1.1 Balanço de energia

O Balanço de Energia (BE) consiste na forma em que o saldo de radiação é repartido em diferentes componentes. Vários autores, como Bowen (1926), Wang; Li; Cribb (2006) e Timmermans et al. (2007), tem apontado que os principais componentes do balanço de energia são o saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo ( $G$ ), calor sensível no ar ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ), dado pela Equação 1:

$$R_n + G + H + LE \approx 0 \quad (1)$$

Bowen (1926) propôs que a evaporação pode ser obtida a partir da troca de energia entre um corpo d'água e a coluna de ar acima deste, em função da temperatura e da pressão de vapor. A evaporação seria uma parcela do balanço de energia dado pelas variáveis energia radiante, calor sensível (energia usada para variar a temperatura da água), calor latente (energia para evaporação), e pequenas perdas de energia que possam ocorrer por outros meios. Este foi um dos primeiros estudos a propor a estimativa de balanço de energia utilizando a relação entre calor sensível e calor latente.

Nota-se que das pequenas perdas apontadas por Bowen (1926), apenas o fluxo de calor no solo ( $G$ ) é considerado na equação (1), sendo a menor parcela do balanço de energia. O fluxo de calor no solo ocorre por condução, molécula a molécula, sendo dependente da radiação solar global incidente, e também de características do solo como, por exemplo, presença de água, tipo de solo e tipo de cobertura do solo (MOURA; QUERINO, 2010).

A magnitude de  $R_n$  varia de acordo com o balanço entre o fluxo de ondas curtas que chegam e que são refletidos pela superfície da Terra e o fluxo de ondas longas que são emitidas pela superfície da Terra e pela atmosfera (ALLEN et al., 2011), sendo, desta forma, dependente entre outros fatores, da

nebulosidade, latitude, altitude, horário do dia e época do ano (CUNHA et al., 1993).

Tanto  $G$  quanto  $R_n$  são variáveis de fácil medição com o uso de equipamentos ou mesmo estimativas baseadas em dados de superfície. Através das equações e modelos mais complexos cabe o trabalho de determinar as variáveis  $H$  e  $LE$  (ALLEN et al., 1998).

Allen et al. (2007) apontaram que o termo  $H$ , energia destinada ao aquecimento do ar, pode ser estimado através da equação de transferência de massa (Equação 2):

$$H = \rho_{ar} C_p (dT/r_{ah}) \quad (2)$$

sendo  $\rho_{ar}$  densidade do ar ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ),  $C_p$  calor específico do ar a uma pressão constante ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ),  $r_{ah}$  resistência aerodinâmica do ar entre duas superfícies próximas a diferentes alturas ( $\text{s.m}^{-1}$ ) e,  $dT$  diferença de temperatura entre as duas superfícies próximas de diferentes alturas (K).

$LE$  representa a energia destinada à evaporação da água presente no solo e na vegetação, sendo chamado de calor latente de evapotranspiração. A determinação deste termo é de grande utilidade para o manejo dos recursos hídricos. Na agricultura irrigada, serve de auxílio para informar quando e quanta água deve ser usada para irrigação, e na agricultura de sequeiro permite estabelecer o zoneamento de risco agroclimático e ajustar as épocas de semeadura das principais culturas exploradas no Brasil (CUNHA et al., 2001a; CUNHA et al., 2001b). A  $LE$  varia de acordo com a temperatura, radiação incidente, albedo e cobertura vegetal e uso do solo (ADAMATTI et al., 2017).

Diversos estudos (SOUZA et al., 2015; MACHADO et al., 2016) tem quantificado as diferenças na partição dos componentes do balanço de energia em locais secos e em locais com maior disponibilidade hídrica. Verifica-se que quanto mais seco o ambiente, maior será a energia destinada ao aquecimento

do ar e do solo, e quanto mais água no ambiente maior parcela de energia é utilizada à evapotranspiração.

### 2.1.2 Métodos para obter o BE usando imagens de satélite

Diversos modelos estão disponíveis para estimativa de BE utilizando dados de entrada proveniente de sensoriamento remoto. Atualmente destacam-se o SEBAL e o METRIC como modelos com bons resultados para a estimativa do BE (SCHIRMBECK et al., 2017), nas condições de clima subtropical úmido. O modelo SEBAL foi desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e utiliza dados de albedo, índice de vegetação e temperatura da superfície obtidos via sensoriamento remoto na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, para estimar o balanço de energia da superfície (BASTIAANSEN, 1998), aliados a dados medidos em estações meteorológicas de superfície. O METRIC foi desenvolvido por Allen et al. (2007), e segue os mesmos princípios do SEBAL.

Esses dois modelos calculam o LE como termo residual, transformando a Equação 1 na Equação 3:

$$LE = R_n - G - H \quad (3)$$

Conforme Allen et al. (2007),  $R_n$  pode ser obtido através da Equação 4:

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (4)$$

sendo  $R_{s\downarrow}$  fluxo incidente de radiação de onda curta ( $W.m^{-2}$ ),  $\alpha$  albedo da superfície (adimensional),  $R_{L\downarrow}$  fluxo incidente de radiação de onda longa ( $W.m^{-2}$ ),

$R_{L\uparrow}$  fluxo de saída de radiação de ondas longas ( $W.m^{-2}$ ), e  $\epsilon_0$  emissividade termal da superfície (adimensional).

G pode ser obtido através da Equação 5 (ALLEN et al., 2007):

$$G = (T_s - 273,15)(0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98 NDVI^4))R_n \quad (5)$$

sendo  $T_s$  temperatura da superfície (K),  $\alpha$  albedo da superfície (adimensional) e, NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) índice de vegetação (adimensional).

Uma vez que  $R_n$  e  $G$  são de fácil obtenção (SANCHEZ et al., 2008), o trabalho concentra-se na estimativa do  $H$ , sendo esta a maior diferença entre SEBAL e METRIC (ALLEN et al., 2011).

O princípio dos dois modelos para a estimativa do  $H$  segue a equação 2 (ALLEN et al., 2007). A diferença entre os dois modelos de estimativa de  $LE$  consiste na consideração que o SEBAL faz de que é possível haver pixels de valores extremos (“âncoras”), ou seja, pixel quente em que  $LE = 0$ , áreas extremamente secas, e pixel frio em que  $H = 0$ , áreas extremamente úmidas. Já o METRIC considera que há a possibilidade de ter algum valor residual de  $LE$  nos pixels quentes e há a possibilidade de ter valor residual de  $H$  nos pixels frios. Desta forma, no METRIC para o pixel frio utiliza-se  $LE \approx 1,05 ETo$  e  $H = R_n - G - LE$ . Já para o pixel quente  $LE$ , equivale a evaporação do solo estimada por meio do balanço hídrico proposto por Allen et al. (1998) e  $H$  pode ser obtido da mesma forma como no pixel frio,  $H = R_n - G - LE$ . Esta alteração faz com que o desempenho do método METRIC seja mais próximo da realidade para condições de climas úmidos, conforme investigado por Schirmbeck et al. (2017), que é o caso do Estado do Rio Grande do Sul.

Outros trabalhos têm usado o modelo METRIC para estimativa de evapotranspiração em diferentes contextos, obtendo também bons resultados, como por exemplo Diniz (2021) que estimou a  $ETr$  em área irrigada com cultivo

de banana-nanica em Barbalha – CE, e French et al. (2015) que estimou ETr para uma área de cultivo de algodão irrigado em Maricopa – Arizona/USA.

### 2.1.3 Sensor MODIS

O Sensor MODIS está a bordo da plataforma Terra, desde 18 de dezembro de 1999, e da plataforma Aqua, desde 04 de maio de 2002, pertencentes ao programa Sistema de Observação da Terra (*Earth Observing System* – EOS). Esse programa foi criado devido à necessidade em monitorar as mudanças climáticas globais. O fato de esse sensor estar presente em duas plataformas exibe a importância que ele apresenta para esse tipo de monitoramento (RUDORFF et. al., 2007).

Os dados brutos do sensor MODIS não são fornecidos abertamente a qualquer usuário. Os dados podem ser adquiridos gratuitamente pelo site <https://earthexplorer.usgs.gov> a partir do nível 1A (que já contém os coeficientes de calibração geométrica e radiométrica) até o nível 4 (saídas de modelos ou resultados de análises de níveis inferiores). Por ser fornecido dados em forma de produtos, facilita muito o seu uso, pois o usuário não tem a necessidade de fazer o pré-processamento para corrigir a imagem geométrica, atmosférica e radiometricamente (LINDSEY; HERRING, 2021).

Este sensor está em órbita síncrona com o sol, polar. Conta com 36 bandas, sendo que a resolução espacial é de 250 metros para as bandas 1 e 2, 500 m para as bandas 3 até 7 e de 1000 m para as bandas 8 até 36 (LATORRE et al., 2003). Alguns dos produtos apresentados pelo MODIS podem ser utilizados nos modelos que estimam BE, como o MCD43A3 (Albedo), MOD11A2 (Temperatura de superfície e emissividade), MOD13A2 (Índice de vegetação), mas também é disponibilizado o produto MOD16A2 (Evapotranspiração).

O MCD43A3 fornece dados diários de albedo em composições de 16 dias, e tem resolução espacial de 500 metros. Com este produto o usuário obtém informações da reflectância hemisférica direcional e bihemisférica para as bandas de 1 a 7 e as faixas do visível, infravermelho próximo (NIR) e de comprimentos de onda curta (WANG et al., 2018). Trabalhos como os de Salleh et al. (2012), Moraes et al. (2019) e Silva et al. (2019), sobre parâmetros de

qualidade do ar, utilizaram dados de Albedo de cultivo de cana na caatinga e Evapotranspiração em área de cana-de-açúcar irrigada, com resultados que atestam a qualidade dos produtos disponibilizados.

O produto MOD11A2 fornece dados diários de temperatura da superfície terrestre com resolução espacial de 1 km, na unidade de medida Kelvin, e dados de emissividade referente as bandas 31 e 32. Este é um dos principais produtos relacionados aos processos da superfície terrestre, sendo necessário para estudos sobre clima (DE SANTOS et al., 2018), hidrografia (MATOS, 2009), entre outros.

Para estudos sobre vegetação, muito frequentemente é utilizado o produto MOD13 que fornece dois índices ao usuário: o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*). A resolução espacial é de 250 m, 500 m e 1 Km, com resolução temporal de 16 dias (DIDAN et al., 2015). Tanto o NDVI quanto o EVI operam utilizando a diferença entre a faixa espectral do vermelho, no visível, e do infravermelho próximo. Porém, o EVI ainda utiliza um fator de ajuste para o solo e coeficientes de ajuste para transparência da atmosfera. Isso faz com que a maior diferença entre estes dois índices seja a detecção de informações frente a áreas mais densamente vegetadas, pois o NDVI apresenta saturação em condição de elevada biomassa verde. Assim, o NDVI é de maior aplicabilidade quando o interesse está em analisar mudanças internas da vegetação, sendo mais sensível a clorofila, e o EVI é mais sensível a estrutura do dossel e índice de área foliar (IAF) (LATORRE et al., 2003). No Rio Grande do Sul, são muitos os estudos que vêm utilizando o NDVI do produto MOD13Q1 para mapear e inferir sobre as condições de crescimento e desenvolvimento de culturas anuais, bem como das pastagens naturais do bioma Pampa (MENGUE et al., 2019; FONTANA et al., 2015; WAGNER et al., 2013)

O produto MOD16A2, evapotranspiração, é uma composição de 8 dias com resolução espacial de 500 m (RUNNING et al., 2017). Os dados gerados pelo produto MOD16A2, contudo, apresentam algumas incertezas devido a equivocadas classificações do uso e cobertura da terra (RUHOFF et al., 2011) e da consideração de características globais podendo sub- ou superestimar os

valores de evapotranspiração (AGUILAR et al., 2018, SOUZA et al., 2019). Mu et al. (2013) apontam que das 46 torres usadas para parametrização e validação do produto, 44 estão localizadas na América do Norte.

#### 2.1.4 Reanálise

Os dados de reanálise meteorológica baseiam-se em dados históricos, advindos de diversas fontes (estações meteorológicas, rádio sondagem, medidas de navios, satélites, entre outras), com os quais são feitas assimilações e reanálises de dados medidos para serem utilizados em modelos de previsão e estimativas de diferentes componentes e variáveis de interesse, geralmente em escalas regionais. Esse tipo de dado é uma opção de grande utilidade para contornar problemas referentes a falta de estações meteorológicas que forneçam dados de campo ou ainda, problemas de falha em séries de dados decorrente do mal funcionamento dos sensores (DEE et al., 2011; APARECIDO et al., 2019).

Uma das fontes de dados de reanálise mais utilizadas é a do projeto ERA-Interim (ECMWF Re-Analysis – Interim) do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF). Este conjunto de dados foi intensamente utilizado por vários autores (DI GIUSEPPE; TOMPKINS, 2014; BROWNE et al., 2019; ZSOTER et al., 2020) em diferentes tipos de estudos, como, por exemplo, estudos sobre malária, oceano-atmosfera, inundação, entre outros.

Para o Rio Grande do Sul, Moreira et al. (2018) testaram a acurácia do ERA Interim através da análise de temperatura do ar a 2 metros da superfície, para o período de 2002 a 2012, frente a dados observados em estações meteorológicas. Por meio do coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de eficiência, os autores concluíram que a temperatura do ar do ERA Interim tem alta correlação ( $>0,76$ ) e precisão ( $\approx 1$ ) com dados observados, sendo, portanto possível usar os dados de reanálise quando da ausência de dados medidos.

O projeto ERA Interim abrangeu o período de dados desde 1979 até agosto de 2019. Atualmente o ERA-Interim foi substituído pelo ERA5, que conta com

melhorias em comparação ao anterior, por exemplo o aprimoramento da resolução horizontal que passou de 79 Km para 31 Km (HERSBACH et al., 2019). Demais aprimoramentos podem ser visualizados no Quadro 1:

Quadro 1 - Comparação entre ERA-Interim e ERA5.

Características	ERA-INTERIM	ERA5
Disponibilidade no início de 2020	Até agosto de 2019	1950 em diante
Disponibilidade em tempo real	2 – 3 Meses	2 – 3 Meses (produto final) 2 – 5 Dias (ERA5T)
Resolução espacial	79 Km (TL255) 60 níveis para 10 Pa. 1 Grau	31 Km (TL639) 137 níveis para 1 Pa. 0,36 Graus
Frequência de saída Modelo de superfície terrestre	6 horas para análises 3 horas para previsões TESSEL	De hora em hora (Incerteza a cada 3 horas) HTESSEL
Estimativa de incerteza	Nenhuma	Do conjunto 4D – Var, 10 membros em 63 Km (TL319)
Frequência de saída	6 horas para análises 3 horas para previsões	De hora em hora (Incerteza a cada 3 horas)

Fonte: Adaptado de Herbach et al., 2019.

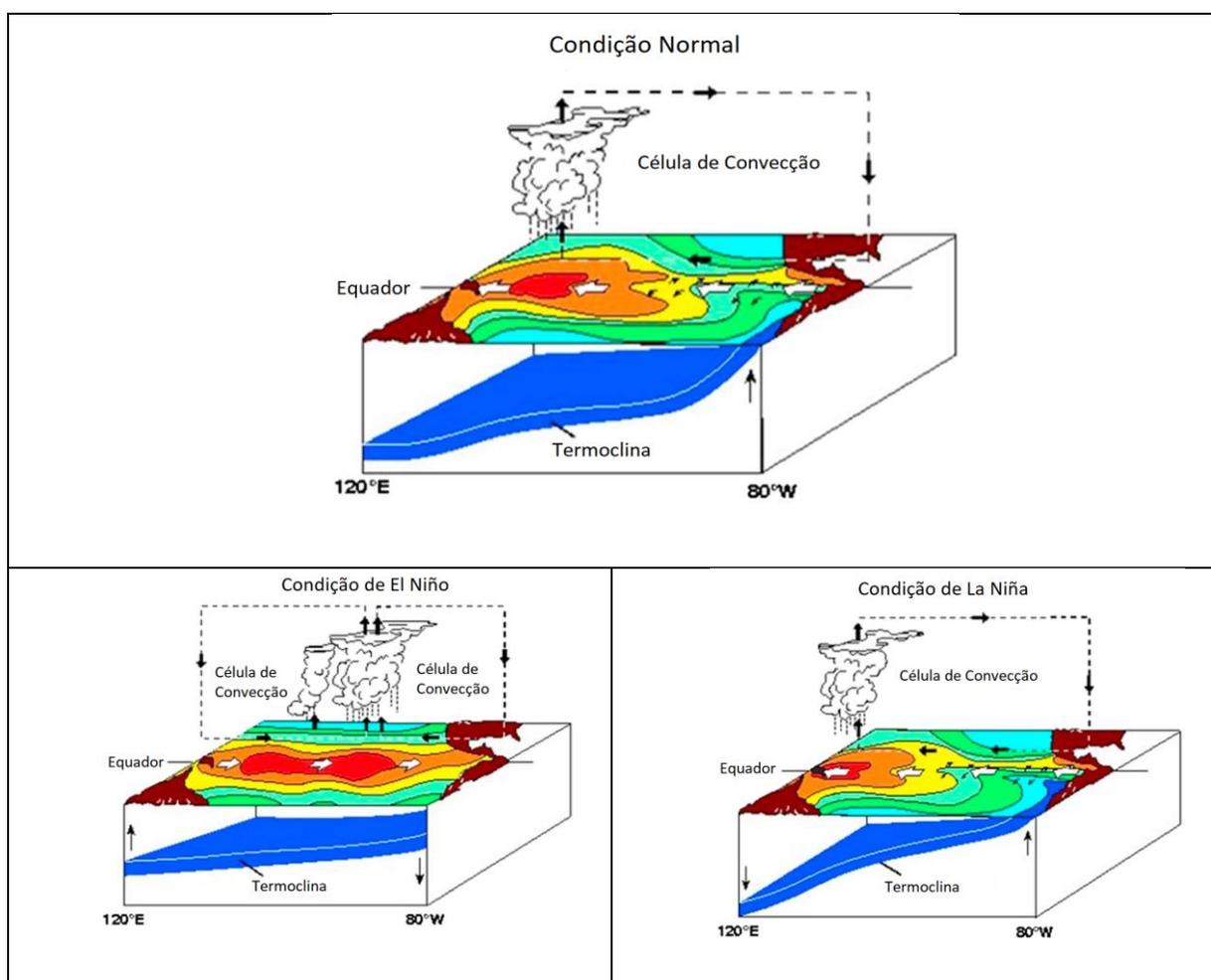
### 2.1.5 ENOS

O El Niño Oscilação Sul é um fenômeno que ocorre associado à mudança de intensidade dos ventos alísios no Oceano Pacífico equatorial. Este fenômeno apresenta duas fases, El Niño e La Niña (Figura 1), sendo que o El Niño é caracterizado pelo enfraquecimento dos ventos alísios, fazendo a camada da superfície do oceano que apresenta água mais aquecida pela radiação solar, ser transportada em direção a região leste do oceano. Com isto, ocorre toda uma mudança de comportamento da célula de convecção da camada atmosférica acima deste oceano (LI, ZHANG e MURAKAMI, 2015, PEZZI et al., 2016).

O calor das águas superficiais que em períodos de condições normais resulta em um centro de baixa pressão próximo a Oceania/Ásia, na fase El Niño

apresenta-se deslocado para o centro e leste do oceano Pacífico, podendo chegar próximo a América do Sul. Desta forma, o ar quente que normalmente ascende próximo a Oceania/Ásia e proporciona precipitação pluvial para estes continentes passa a ascender na região central do oceano, resultando em mais precipitações pluviais próximas a América do Sul. Na fase La Niña ocorre o oposto, com a intensificação dos ventos alísios as águas da camada superficial são mais fortemente transportadas em direção a região oeste do Pacífico, acentuando o efeito de maior umidade próximo a Oceania/Ásia e menor umidade para o lado da América do Sul (YEH et al., 2018).

Figura 1 – Representação das fases do fenômeno ENOS.

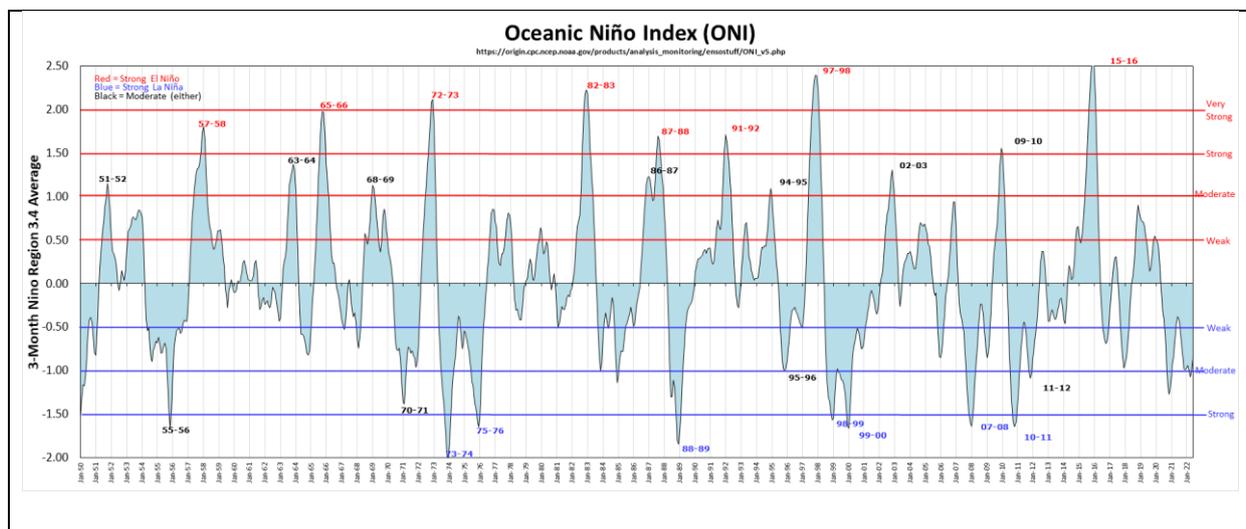


Fonte: Adaptado de Yeh et al., 2018.

Um dos índices intensamente utilizados para monitorar as fases El Niño ou La Niña do fenômeno é o Oceanic Niño Index (ONI). Este índice baseia-se nas variações das médias trimestrais da temperatura da superfície da região central do oceano Pacífico, definida como Niño 3.4 (Figura 2). Quando se observa

anomalias positivas durante 5 trimestres deslocados consecutivos, define-se formação da fase El Niño, no caso das anomalias serem negativas define-se fase La Niña (GLANTZ e RAMIREZ, 2020).

Figura 2 – Índice Niño Oceânico (ONI).



Fonte: Golden Gate Weather Services. Acesso: 10/02/2022.

Este fenômeno tem abrangência global e os efeitos associados em cada região do globo dependem das características locais como altitude, latitude e relevo (ZEBIAK et al., 2015). No sudeste da América do Sul e, especialmente no sul do Brasil, a fase El Niño costuma apresentar aumento da precipitação pluvial (PUCHALSKI, 2000; MATZENAUER et al., 2018), do número de dias com precipitação pluvial (FONTANA e ALMEIDA, 2002), da nebulosidade diurna (CUSTÓDIO et al., 2016) e elevação da temperatura do ar (GUIMARÃES; REIS, 2017), enquanto que a fase La Niña mostra em geral padrão inverso.

Estas alterações nos elementos meteorológicos associadas ao ENOS têm grande impacto no desenvolvimento agrícola, visto que o crescimento e desenvolvimento das plantas dependente em grande parte das condições meteorológicas que estão submetidas. Pilau et al. (2020) apontaram que para a soja o El Niño pode ser um fator positivo na produtividade, enquanto que a La Niña prejudica no rendimento da safra. Contudo, Matzenauer, Maluf e Radin (2020) chamaram a atenção para a variabilidade entre evento, que apesar da maior taxa pluviométrica durante a fase de El Niño, entre 1975/76 e 2019/20, o

maior rendimento de soja ocorreu em ano de La Niña. Ainda, apontaram que em diversas localidades, anos neutros apresentam menores taxas pluviométricas em relação a fase La Niña. Já para o cultivo de milho os autores verificaram que o maior rendimento, dentro do período analisado, ocorreu de fato em ano de El Niño.

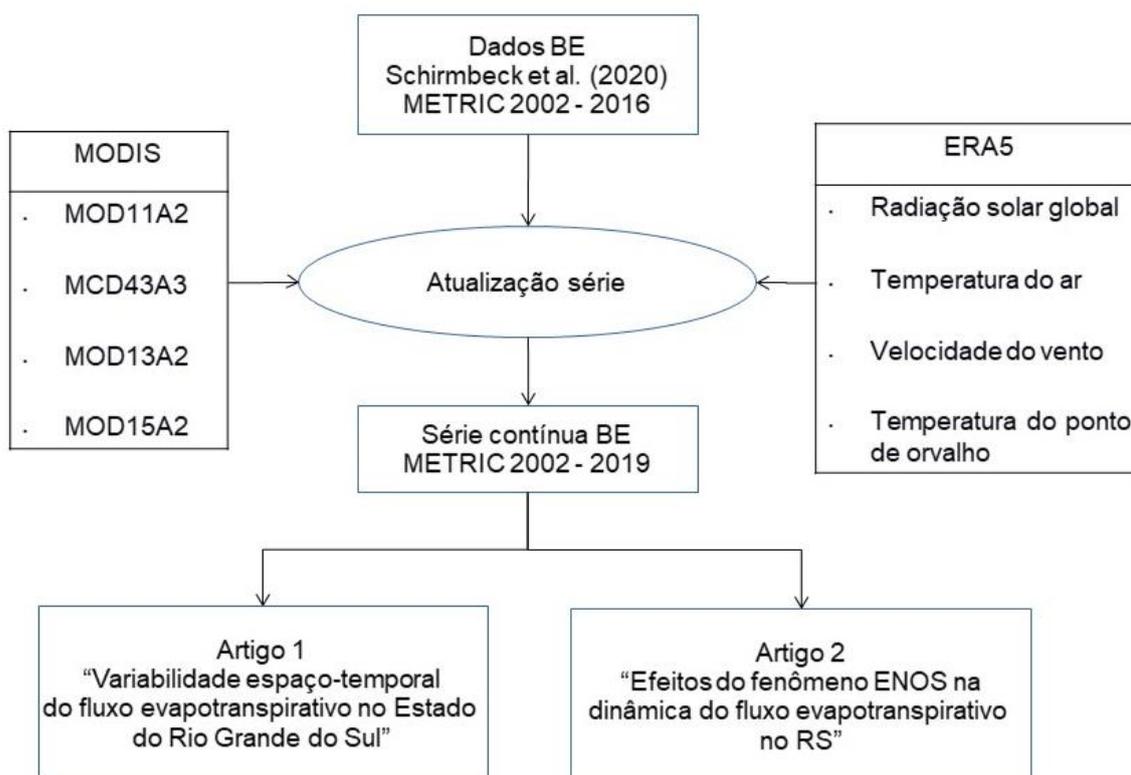
Mas, o padrão de alteração no fluxo evapotranspirativo tem sido pouco estudado frente as fases do fenômeno ENOS. Lobato (2022) em um recente estudo, apontou anomalias no fluxo evapotranspirativo tanto na fase El Niño quanto na fase La Niña do fenômeno ENOS. O autor verificou que enquanto o El Niño ocasionou anomalias negativas para a evapotranspiração potencial (ETP) e para ETr, a La Niña resultou em anomalias positivas. Mas em caso de um fenômeno de La Niña forte pode ser ocasionado também anomalia negativa para ETr devido a uma provável restrição hídrica.

Para o setor agropecuário, a grande vantagem do conhecimento gerado em eventos de ENOS é que, atualmente, existe boa previsibilidade, com alguns meses de antecedência. Isso possibilita, pela primeira vez, que o produtor rural possa tomar diversas providências, no sentido de minimizar prejuízos ou tirar vantagem, em caso de uma previsão favorável.

## **2.2 Metodologia**

O desenvolvimento deste trabalho seguiu os passos indicados pelo fluxograma da Figura 3 e estão detalhados no texto dos artigos 1 e 2.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia do trabalho.



### 2.2.1 Caracterização da área de estudo

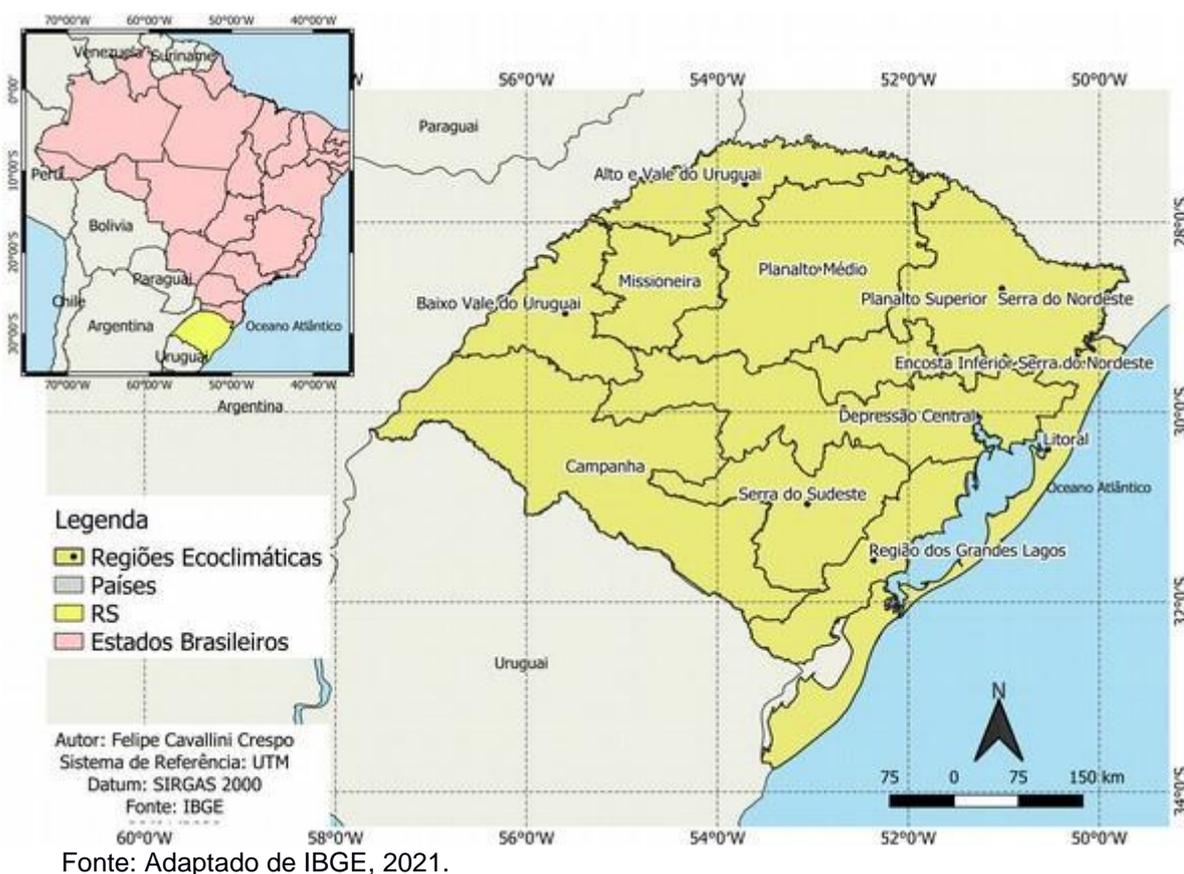
O estado do Rio Grande do Sul, localizado no extremo sul do Brasil, está compreendido entre as latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49° 43' e 57° 39' W (MOREIRA et al., 2018), possuindo uma área total equivalente a 281.092 Km<sup>2</sup> (KUINCHTNER; BURIOL, 2016).

A divisão do RS adotada neste trabalho segue as regiões Ecoclimáticas (REs) propostas pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado do Rio Grande do Sul (1994). Essa divisão tem como base a divisão agroecológica do Estado e, seguindo a mesma metodologia, agrupa os municípios de acordo com suas características climáticas com destaque para o regime pluviométrico, geomorfologia e capacidade e uso do solo.

Ao todo o RS é classificado em 11 Regiões Ecoclimáticas, sendo elas: Alto e Médio Vale do Uruguai, Missioneira, Baixo Vale do Uruguai, Campanha, Planalto Médio, Depressão Central, Serra do Sudeste, Encosta Inferior – Serra

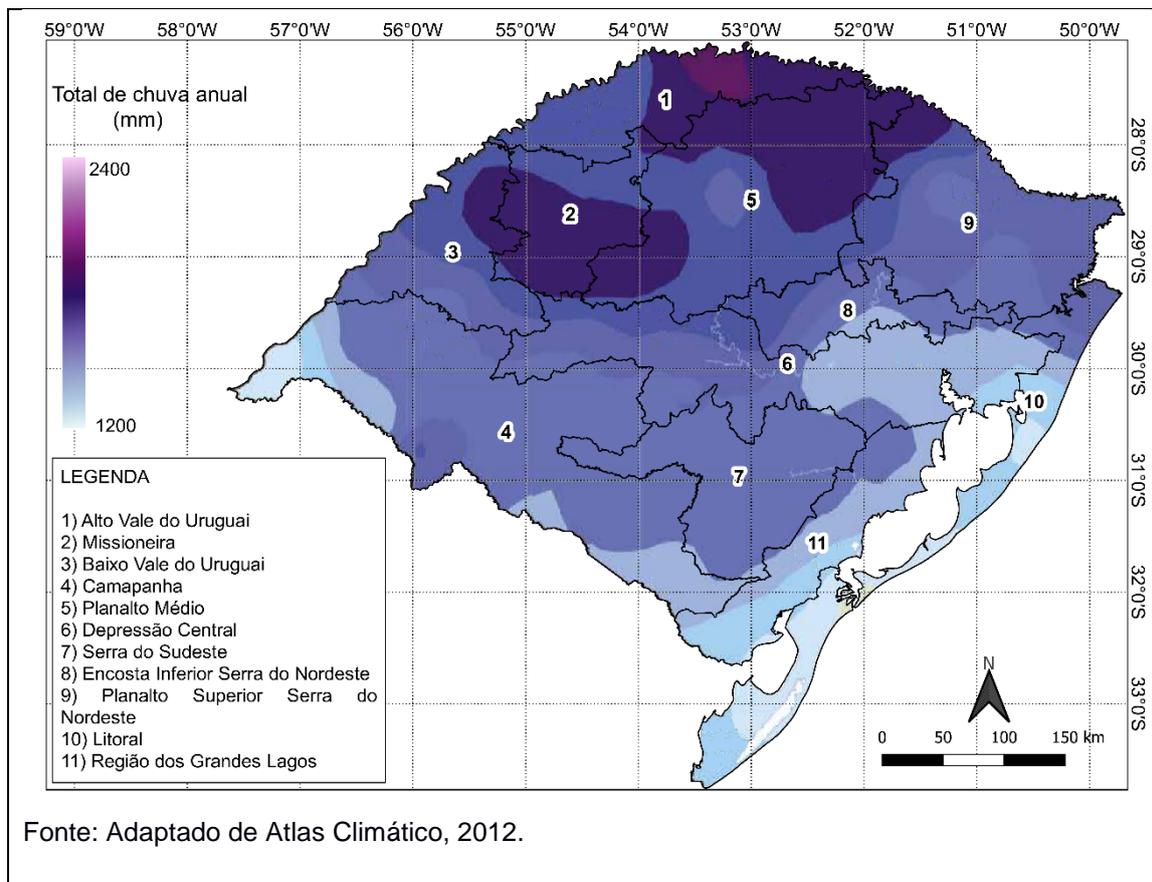
do Nordeste, Planalto Superior – Serra do Nordeste, Litoral, e Região dos Grandes Lagos (Figura 4).

Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo.



Estudos de 50 anos de Radin et al. (2017) sobre a precipitação pluviométrica nas REs do RS, indicam que as Regiões Ecoclimáticas Alto e Baixo Vale do Uruguai, Missioneira, Planalto Médio, e Planalto Superior – Serra do Nordeste, localizadas na porção norte do estado, apresentam precipitação pluvial (PP) anual maior do que as demais Regiões Ecoclimáticas, com valores superiores a 1700 mm (Figura 5). Este é um elemento meteorológico de grande importância na medida em que a maior parte da agricultura do RS é manejada sem irrigação, sendo a precipitação pluvial o único aporte de umidade no sistema.

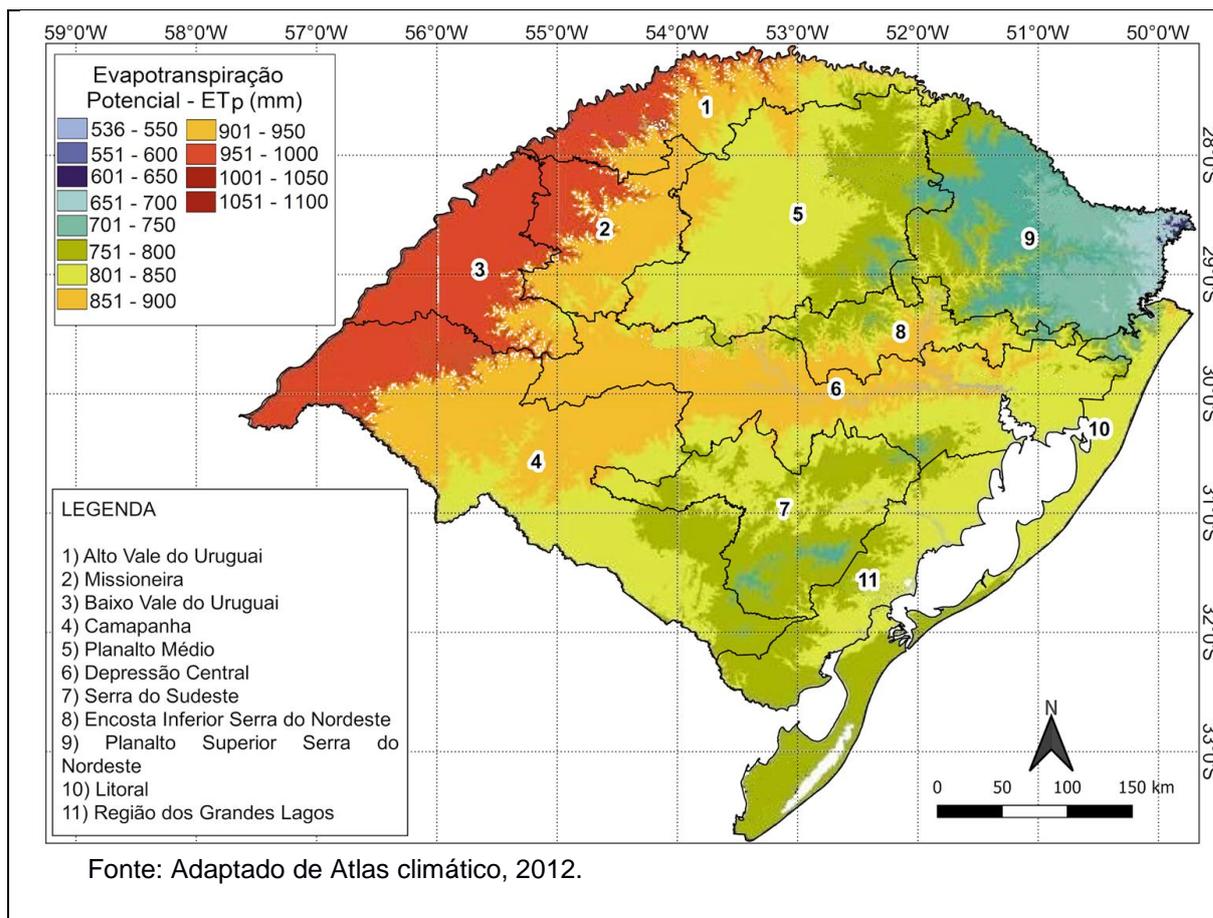
Figura 5 – Mapa da precipitação pluviométrica anual no RS.



Já a Evapotranspiração Potencial (ETP) caracteriza a demanda evaporativa da atmosfera. Na Figura 6 é possível observar que a fronteira oeste do Estado apresenta os maiores valores de ETP, enquanto que as localidades de maior altitude, como a região do Planalto Superior Serra do Nordeste, e a região da Serra do Sudeste apresentam os menores valores de ETP.

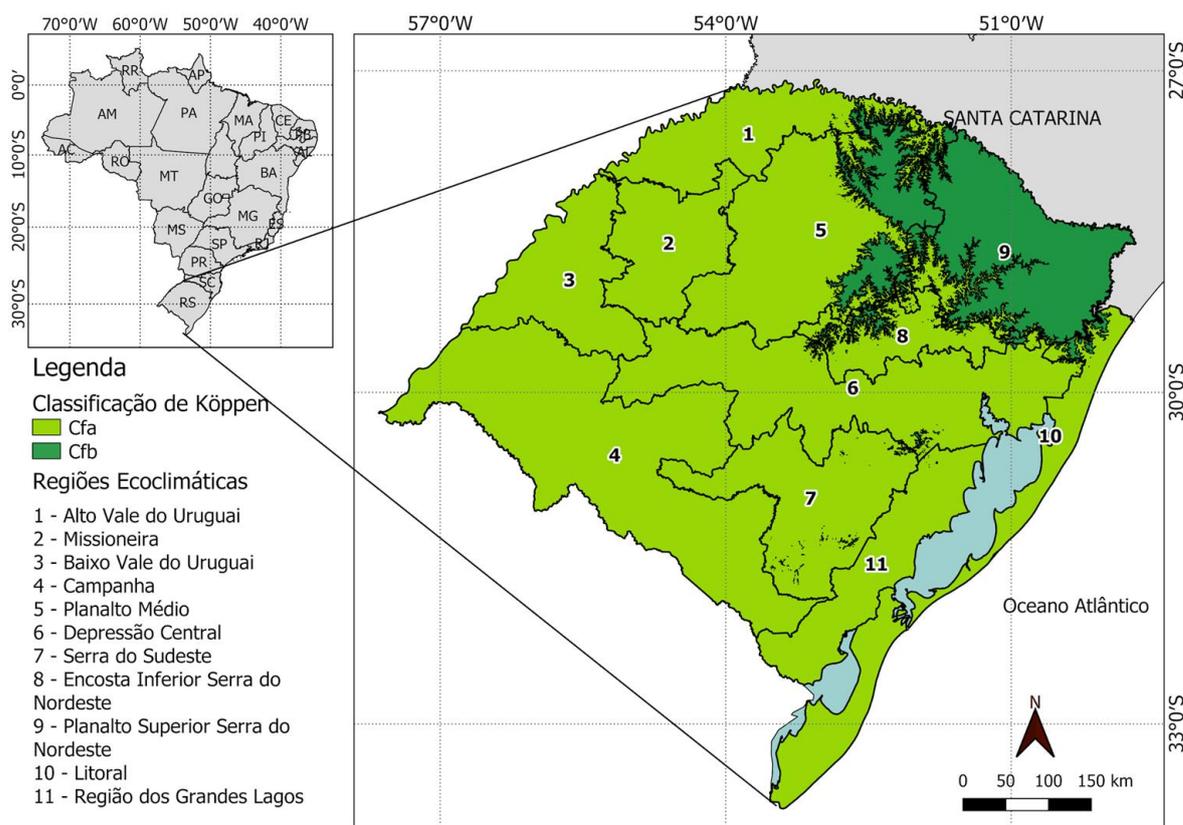
A Evapotranspiração Potencial, quando cotejada frente aos dados de Precipitação Pluvial, ajuda no entendimento das condições hídricas do meio, na medida em que a diferença entre PP e ETP indica a ocorrência de déficits e excessos pluviométricos. No RS a região de maiores excessos pluviométricos é no Nordeste, onde a PP é elevada, com menor ETP. Em contraste, pode-se apontar oeste do RS, com alta ETP e PP menor.

Figura 6 – Mapa da Evapotranspiração Potencial anual no RS.



O clima no RS é pertencente a classe Cf (Temperado chuvoso) da classificação de Köppen (1931), com temperatura média menor no período de inverno, chegando a valores próximos a 10° C, e temperatura média mais elevada no período de verão, atingindo valores em torno de 25° C. A maioria das regiões do RS se enquadram no clima Cfa (Figura 7), temperado chuvoso com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C, apresentando desta forma um verão quente e inverno ameno. Mas algumas partes elevadas das regiões do Planalto Superior – Serra do Nordeste, Planalto Médio, assim como pequenas áreas na Encosta Inferior – Serra do Nordeste, Serra do Sudeste e outras Regiões Ecoclimáticas, se enquadram no clima Cfb, com temperatura média do mês mais quente abaixo de 22 °C, apresentando verão ameno e inverno rigoroso (KUINCHTNER; BURIOL, 2016).

Figura 7 – Classificação climática de Köppen para o RS.



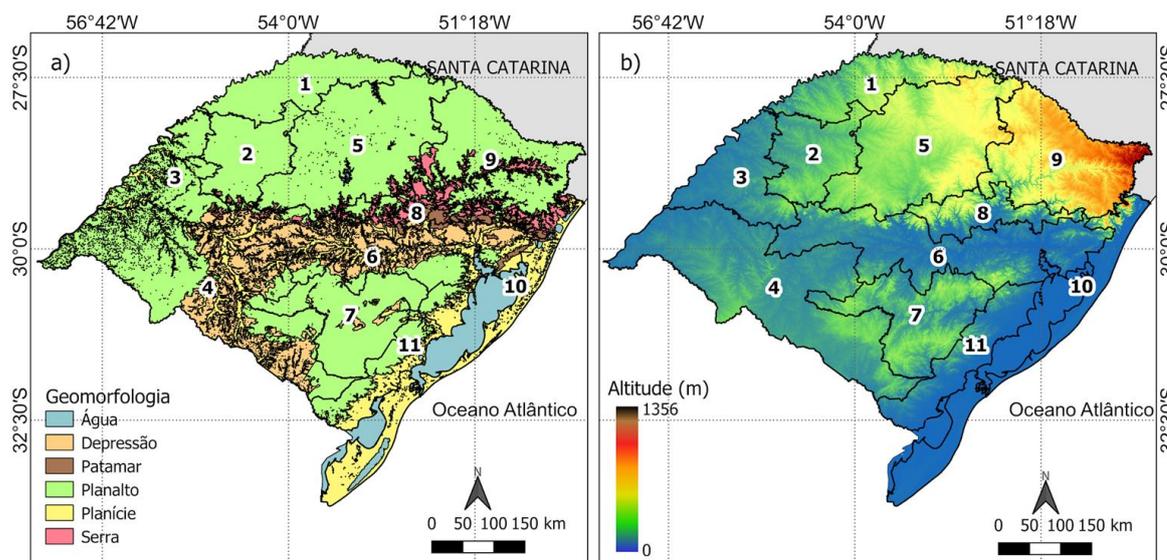
Fonte: Adaptado de Alvares, 2013.

A geomorfologia do Rio Grande do Sul é composta por planaltos, planícies, depressões, serras e patamares (Figura 8a) que variam do nível do mar até cerca de 1300 metros de altitude (Figura 8b) (MIRANDA, 2005).

As maiores altitudes do RS estão presentes no Planalto Meridional, que compreende as Regiões Ecoclimáticas Planalto Superior – Serra do Nordeste, Planalto Médio Alto Vale do Uruguai e Missioneira. Nota-se um gradiente de altitude decrescente no sentido leste-oeste. Ao sul do Planalto Meridional encontra-se a Depressão Central, uma faixa de terras planas e baixas com altitude em torno de 100 – 200 m. No centro-sul do estado, a Região Ecoclimática Serra do Sudeste com uma paisagem composta de morros e serras atinge altitudes por volta de 300 metros. A região da Campanha e Baixo Vale do Uruguai apresentam relevo suave geralmente entre 60 – 120 m, com eventuais elevações que ultrapassam 300 m. A planície Litorânea, onde estão presentes as Regiões Ecoclimáticas Litoral e Região dos Grandes Lagos, é caracterizada

pelas menores altitudes do estado, ficando abaixo de 30 metros (BECKER; MÁRCIA, 2012).

Figura 8 – Mapa do RS a) Geomorfologia e b) Altitude.



Regiões Ecoclimáticas:

- |                           |   |
|---------------------------|---|
| 1 - Alto Vale do Uruguai  | 7 - Serra do Sudeste                    |
| 2 - Missioneira           | 8 - Encosta Inferior Serra do Nordeste  |
| 3 - Baixo Vale do Uruguai | 9 - Planalto Superior Serra do Nordeste |
| 4 - Campanha              | 10 - Litoral                            |
| 5 - Planalto Médio        | 11 - Região dos Grandes Lagos           |
| 6 - Depressão Central     |   |

Autor Felipe Cavallini Crespo  
Datum WGS 84  
17 Jun. 2020.

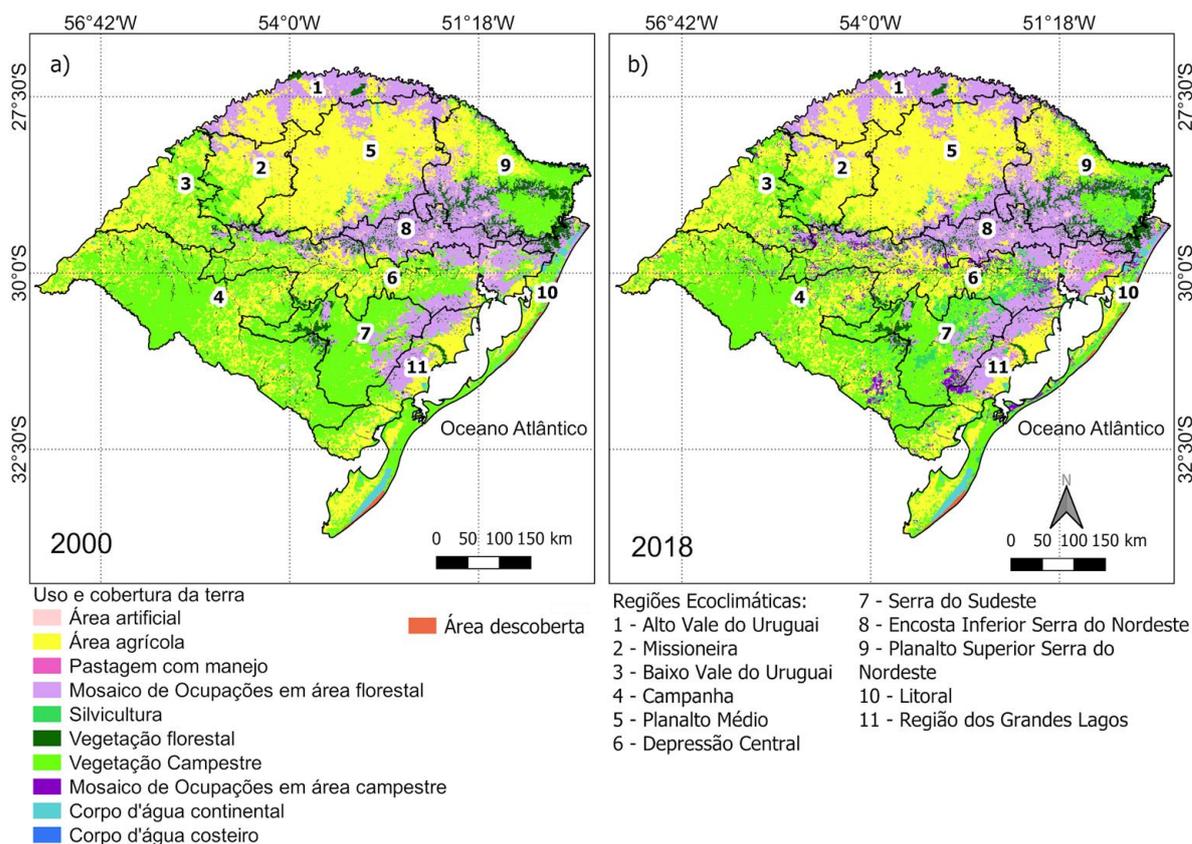
Fonte: Adaptado de Miranda, 2005.

A maior porção do território do RS é coberta por áreas agrícolas, ou seja, terras destinadas a produção de alimentos e matérias primas, áreas de vegetação campestre e áreas de ocupações em área florestal. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área (IBGE, 2021).

Na Figura 9 são apresentados os mapas de uso e cobertura do solo em 2000 (Figura 9a) e em 2018 (Figura 9b) gerados pelo Projeto MapBiomias (2021), o qual apresenta dados com alto grau de detalhe espacial e que apontam mudanças substanciais ocorridas neste período. Por exemplo, dos 193.949 km<sup>2</sup>

de área brasileira do bioma Pampa localizada no sul do RS, 21.356 km<sup>2</sup> de vegetação nativa foi perdida especialmente por conta do crescimento do cultivo de soja.

Figura 9 – Mapa de Uso e Cobertura da terra do RS a) 2000 e b) 2018.



Fonte: Adaptado de IBGE, 2021.

### 2.2.2 Estimativa dos componentes do BE

Os componentes do BE utilizados foram obtidos pela metodologia de Schirmbeck et al. (2020). Os autores elaboraram um banco de dados constituído de valores de Rn, H, G e LE a cada 8 dias para o período de 2002 a 2016.

Para elaboração desse banco de dados, Schirmbeck et al. (2020) utilizaram o modelo METRIC juntamente a dados meteorológicos provenientes de produtos MODIS e dados de reanálise ERA Interim. A opção de utilizar dados de reanálise serviu como alternativa para solucionar o problema da escassez de dados de estações meteorológicas.

O saldo de radiação foi calculado usando a equação 7.

$$R_n = R_{G\downarrow}(1-\alpha) + \epsilon_s \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (7)$$

onde  $R_{G\downarrow}$  é a radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $\alpha$  é o albedo da superfície (adimensional),  $\epsilon_s$  é a emissividade da superfície (adimensional),  $\epsilon_a$  é emissividade da atmosfera (adimensional),  $\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann ( $4,9 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ dia}^{-1}$ ),  $T_a$  é a temperatura do ar (K) e  $T_s$  é a temperatura de superfície (K).

Os demais componentes foram obtidos como descrito no item 2.1.2 deste trabalho. O componente G foi calculado pela equação 5, o componente H foi calculado utilizando a equação 6, e o LE foi obtido como termo residual através da equação 3.

Seguindo a metodologia utilizada por Schirmbeck et al. (2020), foi feita a atualização do banco de dados dos componentes do balanço de energia para o Estado do RS. Essa atualização contou com a utilização dos dados ERA5 no lugar dos dados do ERA Interim devido a atualização do projeto ERA. Também foi feita a substituição do produto MODIS MCD43B3 pelo produto MCD43A3 devido à descontinuidade do fornecimento deste produto. Essas alterações levaram ao reprocessamento de toda a série para todos os anos anteriormente trabalhados e acrescentou-se ainda os anos de 2017, 2018 e 2019 para complementação da série.

Para trabalhar com grande quantidade de dados, assim como imagens de satélite foi utilizado o programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI), que apresenta uma interface intuitiva, é capaz de ler e processar dados em mais de 70 formatos e suporta imagens de diferentes sensores orbitais. Em conjunto com este software foi utilizado a linguagem de programação *Interactive Data Language* (IDL), onde grande quantidade de dados pode ser analisada por linhas de comando, é possível gerar gráficos e pode-se trabalhar com diferentes formatos de dados como HDF, TIFF e JPEG (L3HARRIS, 2020).

### 2.2.3 Dados orbitais

Foram utilizadas imagens orbitais, do sensor MODIS referente as variáveis, albedo, temperatura e emissividade da superfície terrestre, e índices de vegetação e de área foliar, necessárias para o modelo METRIC.

Os dados do sensor MODIS foram obtidos do site da NASA Earthdata – <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, fornecidos de forma gratuita. Os produtos deste sensor, necessários para este trabalho foram o MOD11A2 (Temperatura da superfície da Terra), MOD13A2 (Índice de vegetação), MOD15A2 (Índice de área foliar) e MCD43A3 (Albedo). A resolução espacial é de 500 metros (MOD15A2, MOD16A2 e MCD43A3) e 1000 metros (MOD11A2 e MOD13A2), e a resolução temporal é de 8 dias (MOD11A2 e MOD15A2) e 16 dias (MOD13A2 e MCD43A3).

Em relação aos produtos MODIS citados, para a estimativa de cada componente foram utilizados os seguintes produtos conforme indicado no Quadro 2.

Quadro 2 - Componentes do BE e respectivos produtos MODIS utilizados para suas estimativas.

Componentes BE	Produtos MODIS			
Rn	MOD11A2	MCD43A3	-	-
G	MOD11A2	MCD43A3	MOD13A2	-
H	MOD11A2	-	-	MOD15A2
LE	MOD11A2	MCD43A3	-	-

Fonte: Própria do autor.

Os demais dados meteorológicos necessários para a estimativa dos componentes do BE foram obtidos por meio de reanálise.

### 2.2.4 Dados de reanálises

Do projeto ERA5 foram obtidos os dados de radiação solar global, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho e velocidade do vento. O

download foi feito pelo site do Copernicus Climate Change Service – <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.

Para utilização destes dados em conjunto aos dados do MODIS, foram feitas médias para períodos de 8 dias. A compatibilidade da resolução espacial foi estabelecida a partir do processamento dos dados do ERA5 que possuem originalmente uma resolução de 0,1 x 0,1 graus para uma nuvem de pontos considerando a coordenada central dos pixels e em seguida, com estes pontos foi feita a interpolação pelo método de Krigagem.

Este método de análise espacial considera a relação entre as variáveis vizinhas e é indicado principalmente para trabalhos que visam a caracterização e definição da tendência espacial de variáveis (JAKOB, 2016). Para suavizar os resultados, evitando a superestimação, este método utiliza de médias móveis, e por meio de uma função denominada variograma, a Krigagem estipula as relações de acordo com a distância entre as variáveis, sendo necessário haver correlação entre os dados que se tem (CAMARGO, 1998).

Dos dados de reanálise obtidos, cada componente foi estimado de acordo com os dados indicados no Quadro 3.

Quadro 3 - Componentes do BE e respectivos dados ERA5 utilizados para suas estimativas.

Componentes BE	Dados ERA5			
Rn	Radiação solar global	Temperatura do ar	-	-
H	-	Temperatura do ar	Velocidade do vento	-
LE	-	Temperatura do ar	Velocidade do vento	Temperatura do ponto de orvalho

Fonte: Própria do autor.

## **2.3 Resultados e discussões**

### **2.3.1 Artigo 1**

#### **Spatiotemporal variability of evapotranspiration flux in the State of Rio Grande do Sul, Brazil**

##### **ABSTRACT**

This study aimed to analyze the patterns (mean and variability) of evapotranspiration flux (LE) using the METRIC model for the State of Rio Grande do Sul (Brazil) in order to obtain information on the water status of the environment with a more accurate spatiotemporal detail than is currently available. To do so, a historical series of MODIS products and data from the ERA5 reanalysis were used, covering the period from 2002 to 2019. From 18-year average, a standard average year was generated, serving as a basis for the analyses. The same was done for monthly periods, thus having standard averages for each month of the year. Spatial and temporal variability were analyzed using maps and box plots. The spatial analysis showed that the highest LE values occurred in highland forests of the northeast of the State (above  $160 \text{ W.m}^{-2}$ ), while the lowest ones predominated in the shallow and flat soil regions of western RS (below  $40 \text{ W.m}^{-2}$ ). The temporal analysis showed that summer is when the highest LE values occur, while winter has the lowest ones. In every month of the year, spatial variability was like that of the average pattern, changing only in magnitude. Lastly, the maps generated in this study are unprecedented and can be used to support risk analysis in the agricultural sector.

**Index terms:** METRIC, MODIS, ERA5, energy balance, LE.

##### **INTRODUCTION**

Water conditions are of paramount importance for the agribusiness sector (Gonçalves and Wrege, 2020). In the state of Rio Grande do Sul - RS (Brazil), water deficit is the adverse environmental phenomena responsible for major yield gaps (Sentelhas et al., 2015) and has caused great damage to the sector. Part of these losses could be avoided with irrigation, especially at critical stages of crop growth. But, one of the most important actions to mitigate risks in Brazilian agriculture is the Climate Risk Agricultural Zoning - ZARC (Santos and Martins, 2016), in which information about the water status is the basis for its preparation in most crops. Typically, surface weather-station data are interpolated to obtain water status changes in different regions, using a meteorological or climatological water balance. However, the restricted number of weather stations and uncertainties associated with the spatial interpolation process are limiting factors. For the RS, several studies have been carried out in this regard, which have shown relevant water availability differences from the drier south to the wetter north, as well as frequent water restrictions during the summer (Cunha et al., 2015; Berlato and Cordeiro, 2017; Matzenauer et al., 2020). Even so, there is a lack of information on a large scale, accurate time, and space detailing about this important agrometeorological variable.

Technological advancement has increased ways to obtain more detailed information about water resources. The study of energy balance (EB) stands out to indirectly analyze, through models and meteorological data, the water status in the environment (Lima et al., 2020). EB represents the distribution of energy incident on the Earth's surface into different components, with the main ones being radiation balance ( $R_n$ ), sensible heat flux in the air ( $H$ ), sensible heat flux in the ground ( $G$ ), and latent heat of evapotranspiration ( $LE$ ) (Bowen, 1926; Wang et al., 2006; Timmermans et al., 2007). The latter ( $LE$ ), when compared to data on potential evapotranspiration and rainfall, can indicate surface water

status, which has greater demand for better spatial representation on a scale covering the RS.

Several models from different data sources can be used to obtain EB components. Orbital platforms and meteorological reanalysis projects are of great value as they do not require field trips for sampling, cover extensive areas, and provide a large amount of data. The models can be separated into two groups: i) two layers, such as N95 and Two-Source Time Integrated Model (TSTIM), and ii) single layer, such as Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC) (Tang et al., 2013).

Two-layer models are applied to approach the local dynamics since they best delineate areas with vegetation from bare soils. However, these models require a large amount of input data, which makes work difficult, especially in very diverse areas, in addition to accumulating errors that are detrimental to the result (Yao et al., 2017). Schirmbeck et al. (2017) tested different models and found that single-layer (METRIC) is the most suitable for the humid subtropical climate in the RS. For them, this model is also the most suitable for obtaining LE, once the climate is characterized by rainfall distributed throughout the year. The lack of a defined dry season makes METRIC estimates more coherent for disregarding the possibility of fully dry areas. Schirmbeck et al. (2017) also proposed methodological steps to obtain long continuous series of EB components, using MODIS images and ERA Interim reanalysis data.

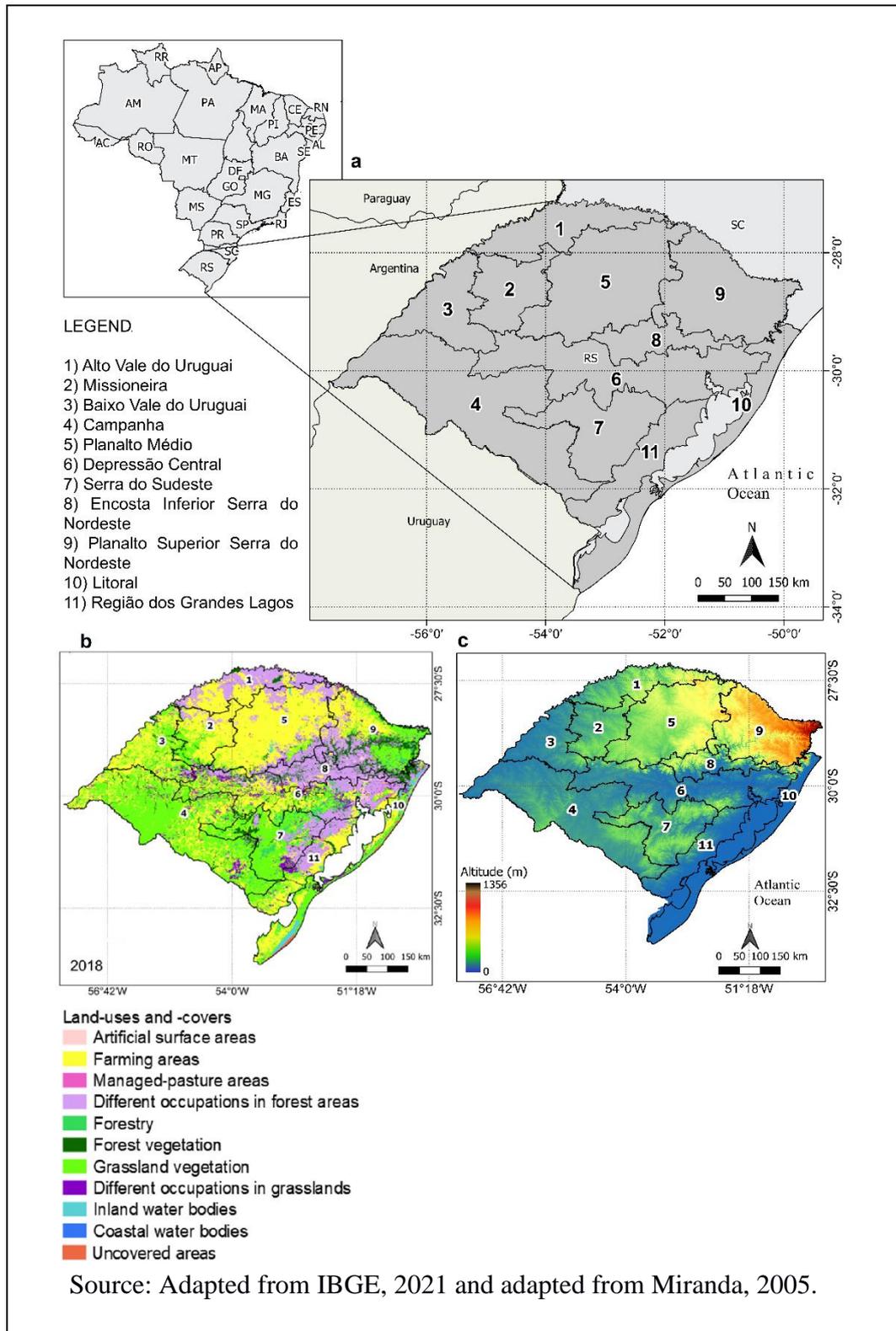
Given the availability to accurately obtain LE, combined with its importance and lack of information to minimize risks and income gaps, increasing farm sustainability and food generation, the present study was then designed. Our goal was to analyze the mean patterns and variability of LE (evapotranspiration flux) obtained from the METRIC model for the state of Rio Grande do Sul (Brazil), thus acquiring water condition

information with a greater spatiotemporal detail than what is currently available. Two questions were analyzed: Are there differences in LE throughout the year? Are there differences in LE between RS Ecoclimatic Regions?

### **MATERIAL AND METHODS**

This study covered the entire territory of RS (Rio Grande do Sul, Brazil) and its eco-climatic regions (ER), from 2002 to 2019 (Figure 1).

Figure 1 – Study area: a) the state of RS with division of Ecoclimatic Regions, its b) Land-uses and -covers and c) Altitude.



Energy balance (EB) components were obtained as proposed by Schirmbeck et al. (2020). We used the METRIC model fed MODIS and ERA Interim reanalysis data. Reanalysis data served to resolve the issue of scarcity of data from weather stations. EB

components were calculated based on Equation 1, which considers only the main components:

$$R_n + G + H + LE \approx 0 \quad (1)$$

wherein radiation balance ( $R_n$ ) was estimated as in Equation 2:

$$R_n = R_{G\downarrow}(1-\alpha) + \varepsilon_s \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2)$$

wherein:  $R_{G\downarrow}$  is the global solar radiation ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ),  $\alpha$  is the surface albedo (dimensionless),  $\varepsilon_s$  is the surface emissivity (dimensionless),  $\varepsilon_a$  is the atmospheric emissivity (dimensionless),  $\sigma$  is Stefan Boltzmann's constant ( $4.9 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ day}^{-1}$ ),  $T_a$  is the air temperature (K), and  $T_s$  is the surface temperature (K).

Sensible heat flux in the soil ( $G$ ) was obtained through Equation 3 (Allen et al., 2007):

$$R_n = ((T_s - 273.15) (0.0038 + 0.0074\alpha) (1 - 0.98 \text{NDVI}^4))G \quad (3)$$

wherein:  $T_s$  is the surface temperature (K),  $\alpha$  is the surface albedo (dimensionless), and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is the vegetation index (dimensionless).

Air sensible heat flux ( $H$ ) was estimated as in Equation 4 (Allen et al., 2007):

$$H = \rho_{\text{air}} C_p (dT/r_{\text{ah}}) \quad (4)$$

Wherein:  $\rho_{\text{air}}$  is the air density ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ),  $C_p$  is the specific heat of air at constant pressure ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ),  $r_{\text{ah}}$  is the aerodynamic resistance of air between two nearby surfaces at different heights ( $\text{s.m}^{-1}$ ), and  $dT$  is the temperature difference between the two nearby surfaces at different heights (K).

Evapotranspiration flux ( $LE$ ) was obtained as the residual term in Equation 1, according to Equation 5:

$$LE = R_n - G - H \quad (5)$$

MODIS images of albedo, Earth surface temperature and emissivity, vegetation index, and leaf area index, which are necessary for the METRIC model, were also used.

MODIS sensor data were freely downloaded from the NASA Earth data website (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>). To do so, the products of this sensor used were MOD11A2 (Earth's surface temperature), MOD13A2 (Vegetation Index), MOD15A2 (Leaf Area Index), and MCD43A3 (Albedo). The spatial resolutions are 500 meters (MOD15A2 and MCD43A3) and 1000 meters (MOD11A2 and MOD13A2), while temporal resolutions are 8 days (MOD11A2 and MOD15A2) and 16 days (MOD13A2 and MCD43A3).

Other weather data to estimate EB components were obtained through reanalysis. From the ERA5 project, data on global solar radiation, air temperature, dew-point temperature, and wind speed were obtained. These were downloaded from the Copernicus Climate Change Service website (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>). Table 1 describes the data used for each EB component.

Table 1 - Energy Balance (EB) components (Rn – radiation balance, G – sensible heat flux in the ground, H – sensible heat flux in the air, LE - latent heat of evapotranspiration) and respective data used for analysis.

Source / EB component	Rn	G	H	LE
MODIS products	MOD11A2 (1 km, 8 days)	MOD11A2 (1 km, 8 days)	MOD11A2 (1 km, 8 days)	MOD11A2 (1 km, 8 days)
	MCD43A3 (500 m, 16 days)	MCD43A3 (500 m, 16 days)	-	MCD43A3 (500 m, 16 days)
	-	MOD13A2 (1 km, 16 days)	-	-
	-	-	MOD15A2 (500 m, 8 days)	-
ERA5 data	Global solar radiation	-	-	-

	Air temperature	-	Air temperature	Air temperature
	-	-	Wind speed	Wind speed
	-	-	-	Dew-point temperature

Eight-day averages were calculated to use ERA5 data together with MODIS data.

Spatial resolution was made compatible by processing ERA5 data, which originally had a resolution of 0.1 x 0.1 degrees for a point cloud, considering the central coordinate of the MODIS pixels. Then, these points were interpolated by the Kriging method.

The ENVI software (Environment for Visualizing Images) was used to work with large amounts of data (e.g., satellite images). This program features an intuitive interface that reads and processes data in more than 70 formats, supporting images from different orbital sensors. Allied to this software, the Interactive Data Language (IDL) programming language was used, wherein a large amount of data can be analyzed by command lines, enabling the generation of plots, and working with different data formats, such as HDF, TIFF, and JPEG. (L3harris, 2020).

After the database was developed, maps of annual and monthly mean LE for the standard year were generated. Therefore, we obtained an average value for all years, as well as an overall average for 18 years, for all 12 months of the year. Temporal variability was analyzed through box plots and diagrams of months and years over the study period. The plots were used to synthetically express data over time, whereas the diagrams aimed to describe the mean, maximum, minimum, and outlier values concisely and clearly.

Finally, the differences between the averages were tested to verify the existence of significant differences between the Ecoclimatic Regions and the months of the year. Data were submitted to analysis of variance (ANOVA) at a 5% significance level ( $P < 0.05$ ). A mixed model was used using the lme4 package of the statistical program R (v.4.1.1). The effects of “Ecoclimatic Region”, “Month” and their interaction were considered fixed in

the model, while “Year” was considered a random effect. The assumptions of the ANOVA were checked through graphical visualization (normality and residual independence graphs). When significant differences were detected between means ( $P < 0.05$ ), they were compared using the Bonferroni test.

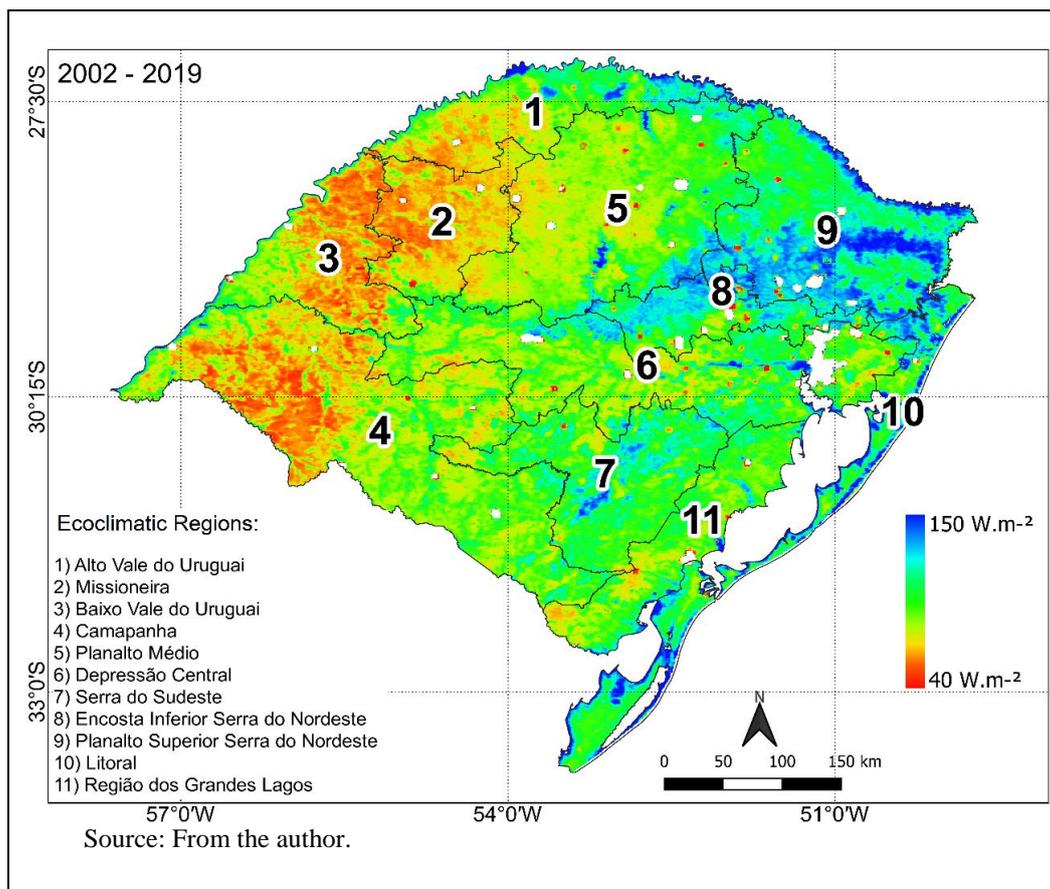
The data were also subjected to cluster analysis, using the R *vegan* and *NbClust* packages. The Euclidean distance was used as a coefficient of similarity. Different grouping methods were tested, with the average method chosen for presenting the highest cophenetic correlation coefficient ( $r = 0.8$ ).

## **RESULTS AND DISCUSSION**

The analysis of the patterns verified in the series of 18 years of data showed important variations in the evapotranspiration flux in RS, both in time and space. In terms of spatial pattern, there is an important gradient West-East in the State, with values close to  $40 \text{ W.m}^{-2}$  westward until  $160 \text{ W.m}^{-2}$  eastward (Figure 2).

The regions of the Lower Slope and Upper Plateau in the Serra do Nordeste had more high values, followed by the Coast and Great Lakes region. The eco-climatic regions on the Western Frontier, Lower Uruguay Valley, Missioneira, Upper Uruguay Valley, and on the west side of the Campanha concentrate the lowest LE values.

Figure 2 – Maps of annual evapotranspiration flux (LE,  $\text{W.m}^{-2}$ ) in the RS State, averages for the period 2002 - 2019.



The mean spatial patterns observed in RS highlights a complex association between water supply and atmospheric evaporative demand while defining LE magnitude, highlighting aspects related to land use and cover, relief, and soil type.

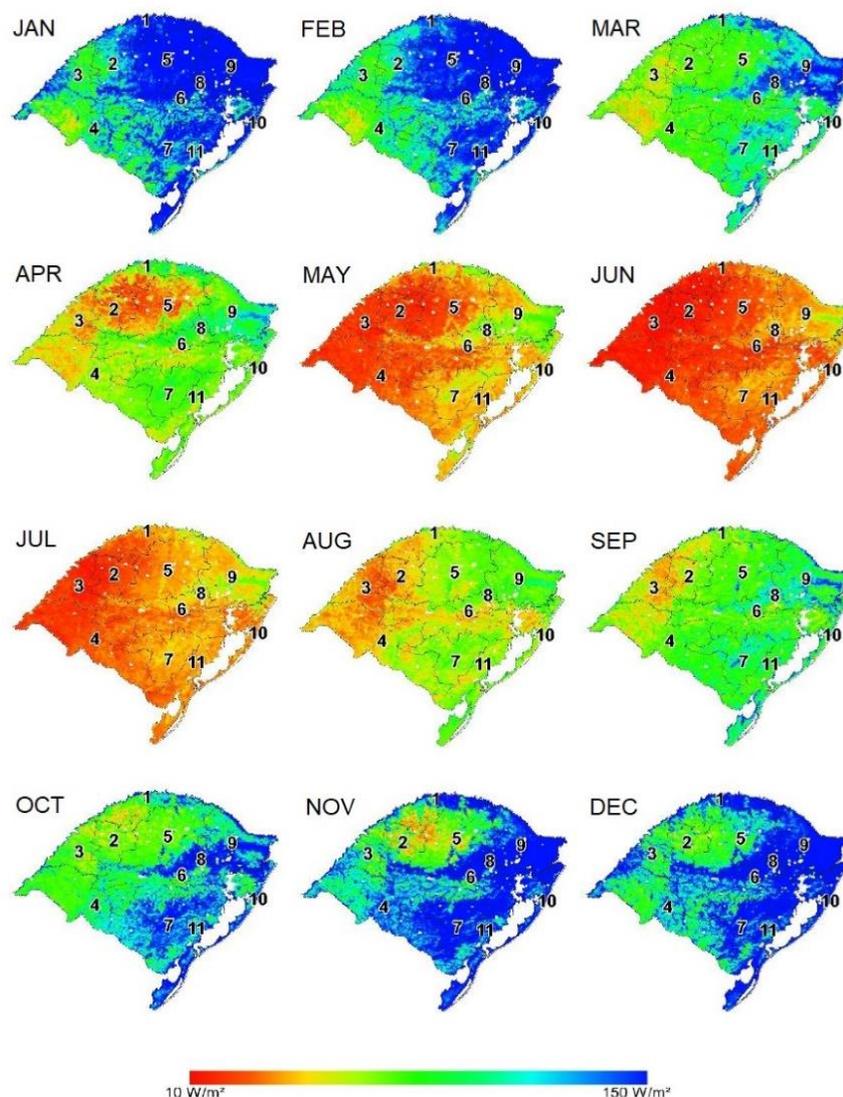
The presence of forests in northeastern RS is marked by the highest annual averages of LE. The pattern is consistent with the deep root system and large leaf area, providing better conditions to maintain evapotranspiration (Svierzoski et al., 2021). In this region, this factor is combined with higher altitudes, generating abundant orographic rainfall, and promoting a wet environment. In several other parts of the State, high average values of LE (in blue color) were observed associated with land occupation with massive forests, both in the north of the State (natural forest areas of protected reserves) and in the southeast and coast (areas of planted forests).

Relief is a determining factor for the pattern in the eco-climatic region Serra do Sudeste, wherein LE averages are relatively higher than those in the surroundings, such

as the Central Depression. Due to the higher rainfall of orographic origin than the surrounding areas, it ended up favoring the elevation in LE. The lowest LE values were observed in most of Western RS. In this portion of the State, soils with lower water storage capacity predominate (Goulart, 2014). Thus, even if the evaporative demand in the region is high, the lower water storage in the soil results in restrictions to the evapotranspiration flux. The greater evaporative demand in this portion of the state is due to the greater availability of solar radiation, higher air temperatures and lower relative humidity (Atlas climático, 2012).

The pattern of LE variation throughout the year can be analyzed in the monthly average images (Figure 3) where the marked seasonality in LE values is observed, with higher values in summer and lower in winter. The average images in each month showed consistency with the spatial distribution pattern of LE observed in the annual average image (Figure 2).

Figure 3 – Monthly average maps of evapotranspiration flux (LE,  $W.m^{-2}$ ) in the period 2002 – 2019 in Rio Grande do Sul.



Source: From the author.

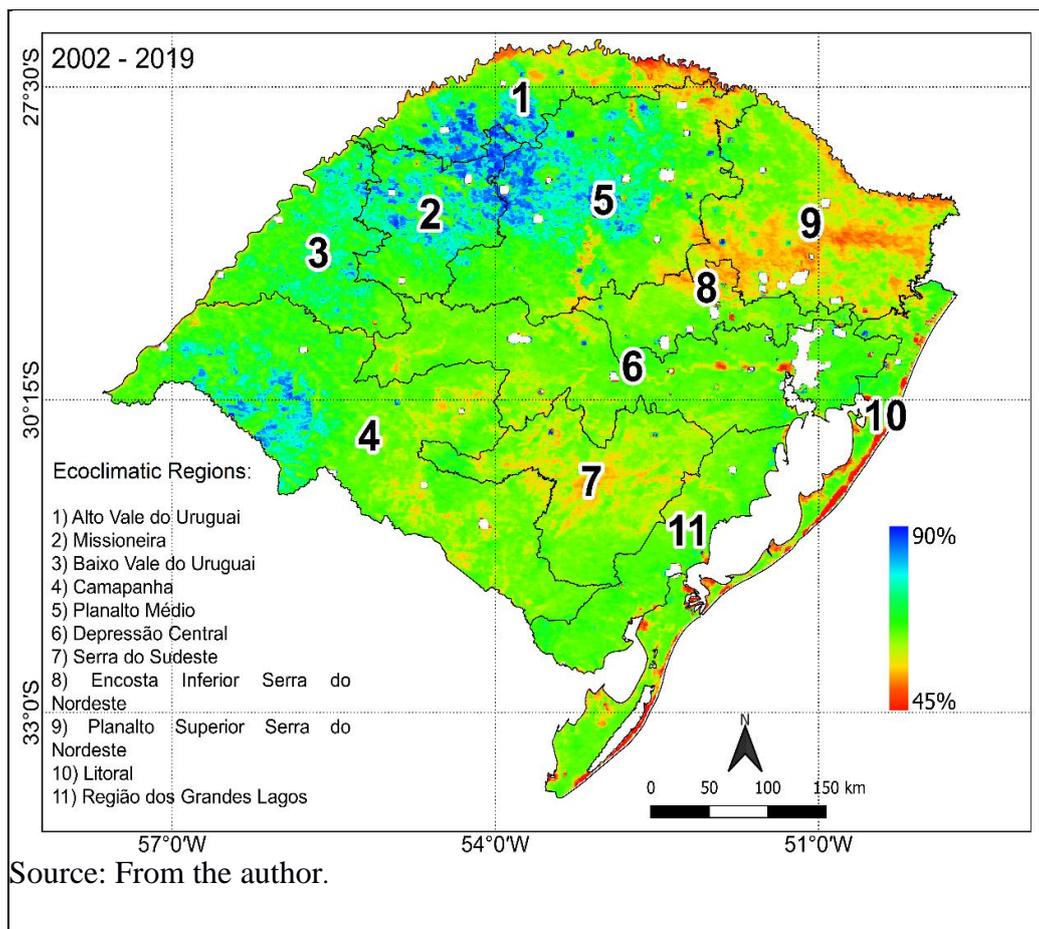
December, January and February were the months that, on average for the entire analyzed period, presented the highest LE values, while May, June and July presented the lowest values, which is consistent with the characteristics of the rainy subtropical climate of the State. Summer is hot, with greater insolation (Custodio et al., 2007) and higher air temperature, resulting in greater atmospheric evaporative demand (ETP). Winter is cold, with lower radiation flux density, fewer hours of sunlight, which results in lower ETP. Given the lack of a dry season in the climate of RS (Radin et al., 2017), with rain occurring

in all months of the year, it is the variations in the evaporative demand of the atmosphere that mostly determine the average seasonality in LE (Figure 3).

In the monthly average images of the period under analysis (Figure 3) it was also observed that during all months there was a concentration of low LE values in the western portion of the Campanha region. This is because the Campanha is one of the regions with the lowest annual rainfall in the State (Radin et al., 2017), combined with the fact, as already mentioned, that soils with low water storage capacity predominate, being shallow and stony with grassland vegetation (Goulart, 2014). The highest values occurred in forest areas in the east of RS.

The variability over time in LE can also be analyzed from the spatial distribution of coefficients of variation - CV (Figure 4), which indicate how much the values in each pixel varied over the years of analysis in relation to the mean value of the series (Lunet et al., 2006). Spatially, the distribution of CVs from 2002 to 2019 showed an inverse relationship with the map of mean LE values in the same period.

Figure 4 - Map of the Variation Coefficient of evapotranspiration flux values (LE,  $W.m^{-2}$ ) in Rio Grande do Sul, period 2002 - 2019.

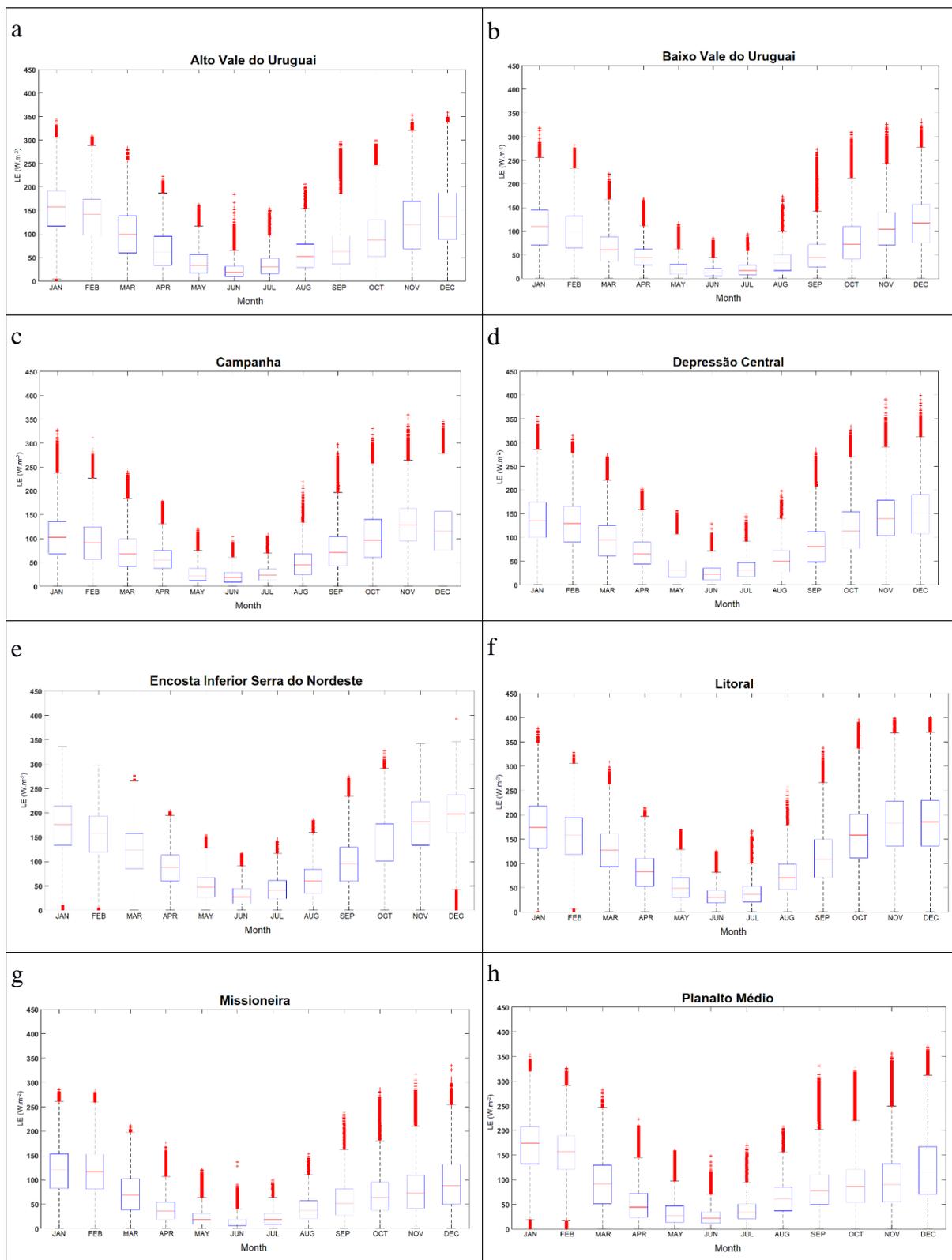


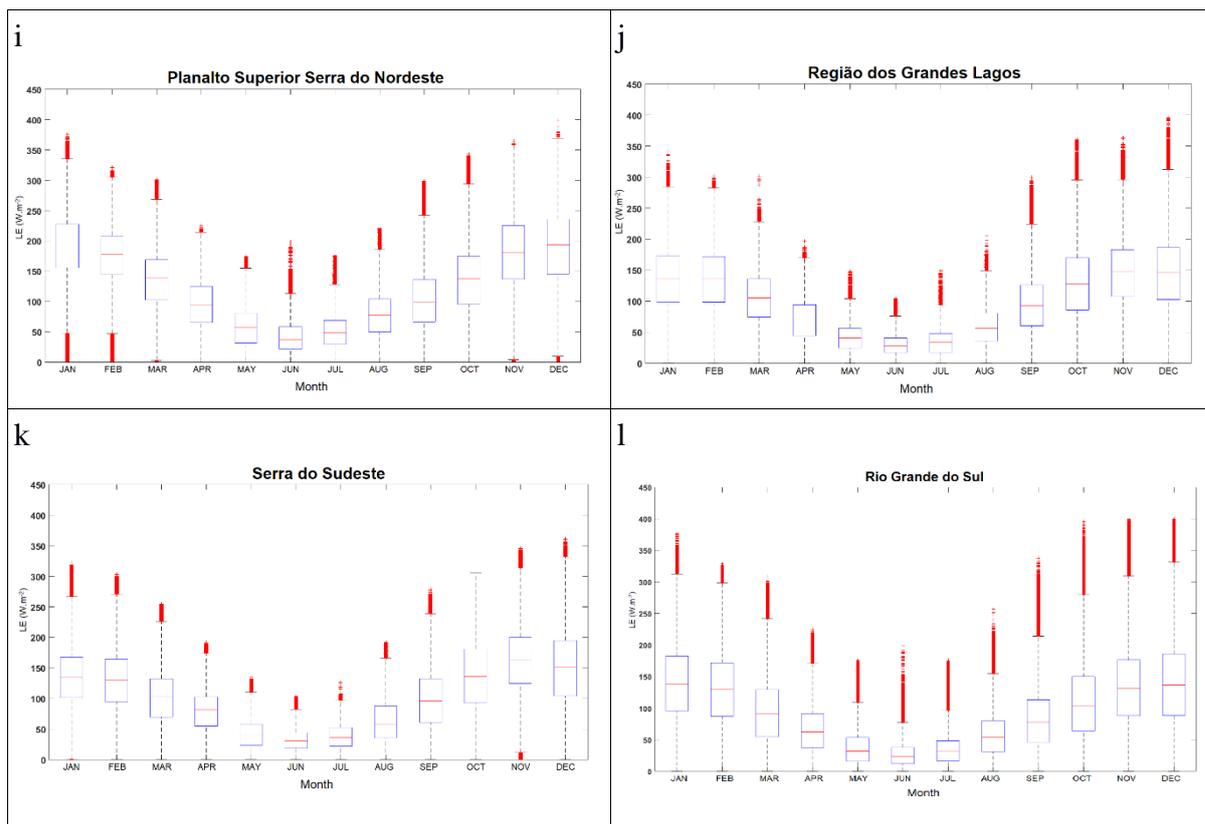
Most of the smaller coefficients of variation are in the east of the State, majorly in the vicinity of the mountain region, covering the following eco-climatic regions: Upper Plateau of Serra do Nordeste, Lower slope of Serra do Nordeste Hills, Middle Plateau, and northern part of the Coast. This is consistent with the previously mentioned discussions associated with the forcing of the evapotranspiration process, whether water supply or evaporative demand from the atmosphere. The areas with the greatest LE variability are located in the northern and western portions of RS, where agricultural activity is intense, with consequent changes in vegetation cover throughout the year associated with the management employed by the rural producer. The Campanha areas also showed higher CV, possibly a consequence of the influence of variations in water storage in the shallow soils that predominate in the region.

The variability throughout the series and the average LE values for each of the Ecoclimatic Regions and for all months of the year are shown in Figure 5 and Table 2,

and seek to answer the question posed about the existence of differences in LE over the course of the year and throughout the territory of Rio Grande do Sul. Thus, the Ecoclimatic Regions were considered based on analysis, which allows the generation of useful information for units widely used in climatological studies. In the box plots, the distribution of LE data throughout the year is shown for each RE, which can, in addition to dimensioning the high variability observed in LE throughout the study series, also support future analyzes related to the frequency of occurrence of certain ranges of critical LE values. This information is useful as basic data for the preparation of the Climatic Risk Zoning, contributing to the improvement of the spatial detailing of the information. In Table 2, using the mean values, the statistically significant differences in LE between regions and months of the year are defined.

Figure 5 – Box Plots of monthly evapotranspiration flux (LE,  $W.m^{-2}$ ) for the Ecoclimatic Regions (a) Alto Vale do Uruguay, (b) Baixo Vale do Uruguay, (c) Campanha, (d) Depressão Central, (e) Encosta Inferior Serra do Nordeste, (f) Litoral, (g) Missioneira, (h) Planalto Médio, (i) Planalto Superior Serra do Nordeste, (j) Região dos Grandes Lagos, (k) Serra do Sudeste, and for the State (l) Rio Grande do Sul, in the period 2002 - 2019.





Source: From the author

Table 2 - Average values of the evapotranspiration flux (LE, W.m<sup>-2</sup>) of the Ecoclimatic Regions and the State of Rio Grande do Sul in each month and in the period from 2002 to 2019.

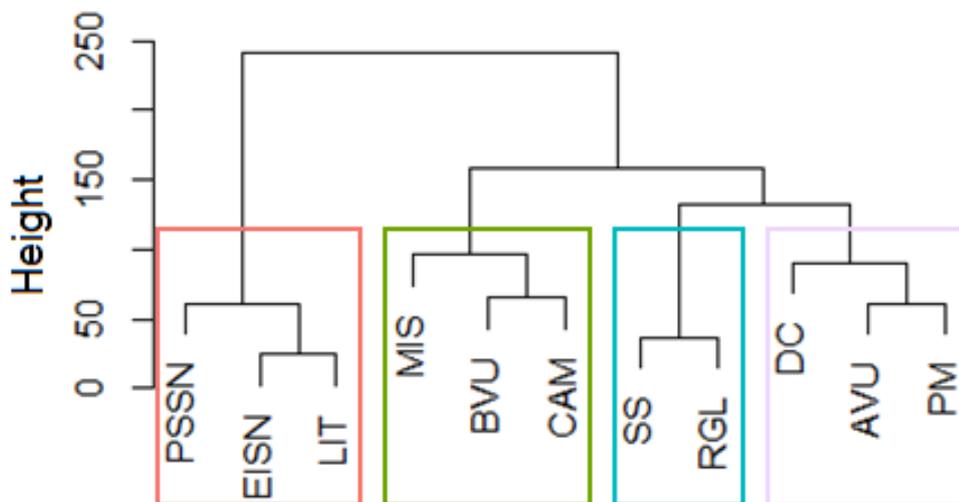
Region	Month												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mean
Alto Vale Uruguai	153 BCa	132 BCb	99 Cc	65 CDEd	36 ABCDef	22 ABf	33 ABCDf	54 BCDde	68 DEFd	90 DEc	122 DEb	134 BCab	84
Baixo Vale Uruguai	110 Ea	96 DEab	65 Ecd	45 Fde	19 Df	17 Bf	18 Df	34 Eef	51 Fde	76 EFbc	107 Efa	115 Ca	63
Campanha	103 Ebc	92 Ecd	72 Eef	55 DEFfg	25 CDh	20 ABh	24 BCDh	46 CDEg	76 CDEde	98 Dbc	128 CDa	115 Cab	71
Depressão Central	134 CDa	127 Ca	95 Cbc	66 BCDEde	35 ABCDfg	24 ABg	32 ABCDfg	50 CDEef	81 BCDcd	106 CDb	141 CDa	145 Ba	86
Encosta Inf. Serra Nordeste	167 ABbc	152 Ac	120 ABd	86 ABe	47 ABfg	30 ABg	42 ABfg	61 ABCf	95 ABCe	130 ABd	176 Aab	190 Aa	108
Litoral	169 ABab	152 ABb	124 Ac	84 ABCd	51 Ae	32 ABe	38 ABCe	72 ABd	110 Ac	149 Ab	179 Aa	180 Aa	112
Missioneira	120 DEa	115 CDa	73 DEbcd	37 Fef	19 Dfg	16 Bg	20 CDfg	40 DEef	57 EFde	68 Fcd	79 Gbc	91 Db	61
Planalto Médio	166 ABa	152 ABa	92 CDc	50 EFef	30 BCDfg	25 ABg	36 ABCDfg	62 ABCde	81 BCDcd	88 DEFc	97 FGc	118 Cb	83
Planalto Sup. Serra Nordeste	185 Aa	170 Aa	132 Ab	95 Acd	54 Ae	40 Ae	51 Ae	78 Ad	104 Ac	129 ABb	180 Aa	184 Aa	117
Região dos Grandes Lagos	131 Dab	132 Cab	103 BCcd	70 BCDe	40 ABCfg	28 ABg	32 ABCDg	58 ABCDef	92 ABCd	122 BCbc	145 BCa	141 Bab	91
Serra Sudeste	132 Db	130 Cb	102 BCc	78 ABCde	40 ABCf	31 ABf	35 ABCDf	61 ABCe	98 ABcd	128 Bb	162 ABa	146 Bab	95
<b>Mean</b>	143	132	98	67	36	26	33	56	83	108	138	142	

Means followed by different letters, uppercase in the column and lowercase in the row, differ by the Bonferroni test at the 5% significance level (P<0.05)

In general, it was once again confirmed that the estimated values for LE in summer are higher than in winter both for RS and in all Ecoclimatic Regions (Figure 5 and Table 2). When analyzing the differences between regions, it was verified that the averages obtained for LE are higher in the Planalto Médio, Encosta Inferior da Serra do Nordeste e Litoral regions in relation to the other regions. But the ANOVA showed interaction ( $P < 0.001$ ) between the REs and the months of the year, indicating that, even with the marked seasonality existing in the variation of LE throughout the year, there are differences in temporal patterns (variation in LE along the year) among Ecoclimatic Regions.

In the analysis of clusters, through which we sought to verify the similarities of patterns of variation in LE between regions, four (4) groups were found (Figure 6).

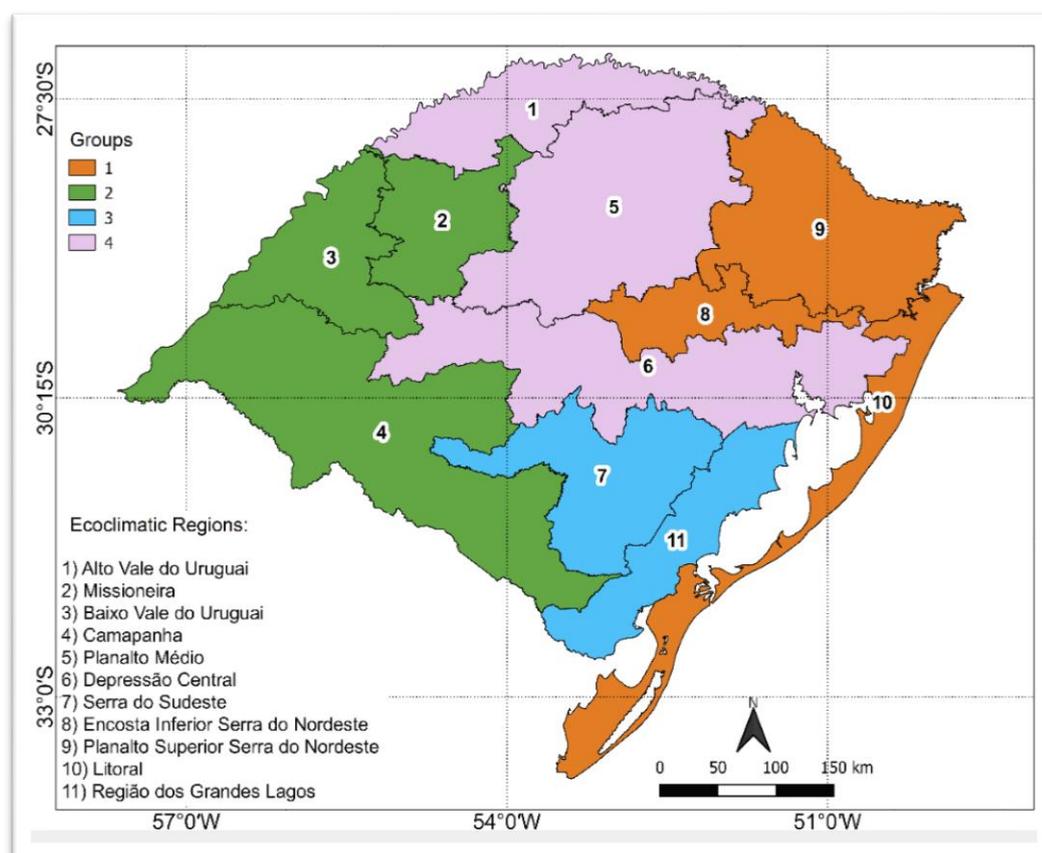
Figure 6 - Dendrogram showing the grouping of the Ecoclimatic Regions of RS regarding variability in evapotranspiration flux (LE,  $W.m^{-2}$ ), in the period 2002 - 2019. (Planalto Superior Serra do Nordeste - PSSN, Encosta Inferior Serra do Nordeste - EISN, Litoral - LIT, Missioneira - MIS, Baixo Vale do Uruguai - BVU, Campanha - CAM, Serra do Sudeste - SS, Região dos Grandes Lagos - RGL, Depressão Central - DC, Alto Vale do Uruguai - AVU, Planalto Médio - PM).



Source: From the author.

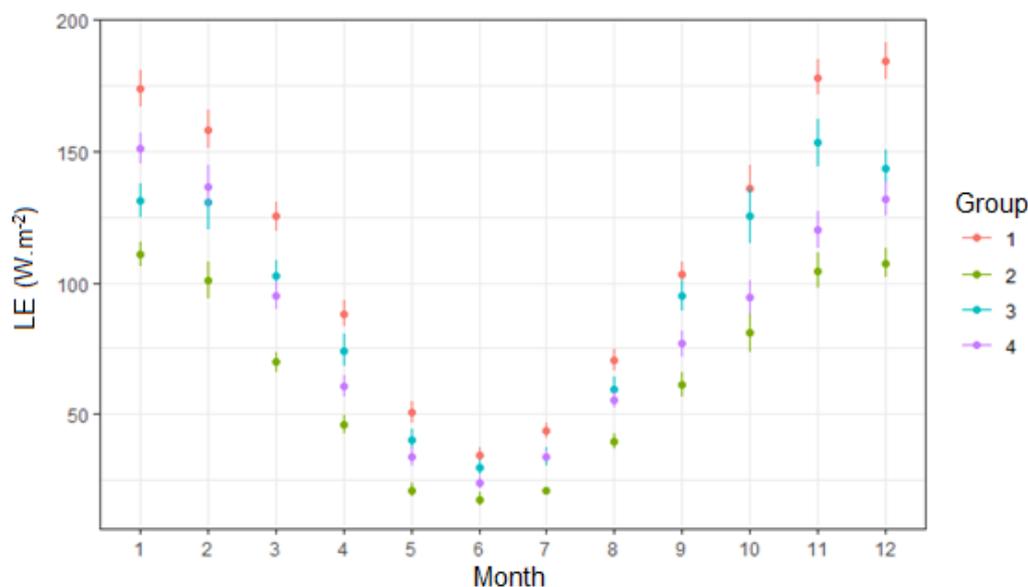
The formed groups separated the REs into: 1) Planalto Superior Serra do Nordeste, Encosta Inferior Serra do Nordeste e Litoral. 2) Missioneira, Baixo Vale do Uruguai e Campanha. 3) Serra do Sudeste e Região dos Grandes Lagos. 4) Depressão Central, Alto Vale do Uruguai e Planalto Médio. The spatialization of these groups in the territory of RS is presented in Figure 7 and in Figure 8. It is possible to verify the variability of LE values in these groups throughout the year.

Figure 7 – Representation of Ecoclimatic Regions in the groups formed by cluster analysis.



Source: From the author.

Figure 8 – Variability in LE ( $W.m^{-2}$ ) throughout the year for the four groups of similar Ecoclimatic Regions.



Source: From the author.

Group 1 was marked by the highest LE values throughout the year and contains the REs located in the northeast of the state. This result is in agreement with the maps with the annual and monthly average values of LE for RS, which indicated the northeastern portion of the State with the presence of the highest values of LE. Group 2, on the other hand, was marked by the lowest LE values. This Group comprised the REs in the western portion of the State (Missioneira, Baixo Vale do Uruguai and Campanha), those identified as the portion with the lowest LE values.

Groups 3 and 4 present intermediate values and intersperse throughout the year, with sometimes Group 3 with values higher than group 4, sometimes Group 4 with values higher than Group 3. These Groups comprise the REs, which are longitudinally located in the central portion of RS. In Group 3 are the REs of the Serra do Sudeste and Região das Grandes Lagoas, while Group 4 includes the REs of the Depressão Central, Alto Vale do Uruguai and Planalto Médio.

The strong opposite variability of the first two groups and the alternation of magnitude of the intermediate groups reflect the marked East-West distinction of RS. The magnitude of the temporal variability of these groups can be seen in Table 3, which presents the mean LE values

per group. It was found that the value of the LE rate in group 1 is approximately 42% higher than in Group 2.

Table 3 - Mean monthly values of evapotranspiration flux (LE, W.m<sup>-2</sup>) for groups with similar REs regarding variability in LE, period 2002 – 2019.

<b>Months</b>													
<b>Groups</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Mean</b>
1	174	158	125	88	51	34	44	70	103	136	178	184	112
2	111	101	70	46	21	18	21	40	61	81	105	107	65
3	131	131	102	74	40	30	34	59	95	125	153	143	93
4	151	137	95	61	34	24	34	55	77	95	120	132	84
<b>Mean</b>	143	132	98	67	36	26	33	56	83	108	138	142	

## CONCLUSIONS

Spatial distribution patterns of LE in the state of Rio Grande do Sul show a complex association between water supply and atmospheric evaporative demand, emphasizing land use and cover, relief, and soil types.

There are differences in LE across the state's territory. The highest values occur in highland forests in the northeast of the state, while the lowest ones predominate in the regions of flat and shallow soils in the west of the state. Considering the average values of the Ecoclimatic Regions, it is verified the existence of four similar groups in terms of LE. The group with the highest averages is formed by the REs of the Planalto Superior Serra do Nordeste, Encosta Inferior Serra do Nordeste e Litoral. The REs Missioneira, Baixo Vale do Uruguai and Campanha form the group of smaller averages.

There are differences in LE throughout the year. LE variability patterns throughout the year are associated with the characteristic humid subtropical climate of the state. Given the absence of a dry season, changes in atmospheric evaporative demand determine variations in LE throughout the year. Summer is when the highest LE values occur, while in winter the lowest ones predominate. In every month of the year, spatial variability is like the mean pattern, changing only in magnitude of values in each period. But even with this marked seasonality in LE, there are differences in temporal patterns (variation in LE throughout the year) between regions.

The highly-detailed spatial maps of LE average patterns and variability generated in this study for the entire Rio Grande do Sul State and every month of the year are unprecedented and can be used to support risk analysis in the agricultural sector.

## BIBLIOGRAPHY

Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). 333p, 2012.

Berlato, M. A., Cordeiro, A. P. A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, p. 273-302, 2017.

Bowen, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical review**, v. 27, n. 6, p. 779, 1926.

Custódio, M. S., Berlato, M. A., Fontana, D. C. Insolação no Rio Grande do Sul: Climatologia e tendência temporal. **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Aracaju – SE, 2007.

Gonçalves, S. L., Wrege, M. S. Considerações sobre metodologias para zoneamento agrícola em escala regionalizada. **Agrometeoros**, v. 26, n. 2, 2020.

Goulart, C. G. **Dinâmica vegetacional e diversidade florística em áreas de vegetação campestre, Rio Grande do Sul, Brasil**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agrobiologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria. 2014.

IBGE. [banco de dados] - <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>> Acesso em 10 jan. 2021.

L3harris. **L3 Harris Geospatial Product Brochures**. Disponível em: <https://www.harrisgeospatial.com/Learn/Brochures>. Acesso em: 20 fev. 2020.

Lima, J. G. A., Sánchez, J. M., Piqueras, J. G., Sobrinho, J. E., Viana, P. C., Alves, S. A. Evapotranspiration of sorghum from the energy balance by METRIC and STSEB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 24-30, 2020.

Lunet, N., Severo, M., Barros, H. Desvio padrão ou erro padrão. **ARQUIVOS DE MEDICINA-PORTO-**, v. 20, n. 1/2, p. 55, 2006.

Matzenauer, R., Maluf, J. R. T., Radin, B. **Regime de chuvas e produção de grãos no Rio Grande do Sul: impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2020. 133 p. il. color. E-book.

Miranda, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>. Acesso em: 10 Jun. 2020

Radin, B., Matzenauer, R., Melo, R. W., Wrege, M. S., Steinmetz, S. Quantificação e distribuição sazonal da precipitação pluvial nas regiões ecoclimáticas do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1161-1169, 2017.

Santos, W. G., Martins, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 73-94, 2016.

Schirmbeck, J., Fontana, D. C., Roberti, D. R., Schirmbeck, L. W. Energy balance from images in humid climate – SEBAL and METRIC. **Agrometeoros**, 25(2), 2017.

Schirmbeck, J., Fontana, D. C., Ruhoff, A. L., Roberti, D. R., Schirmbeck, L. W. Methodology of spatialization of energy balance components using MODIS and ERA Interim data. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 4, p. 1-11, 2020.

Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., Nendel, C., The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science** 153, 1394-1411, 2015.

Svierzoski, N. D. S. Lopes, A. G., Ruezzeno, C. B., Gomes, J. B., Webler, A. D. Componentes do balanço de energia em área de pastagem na Amazônia Ocidental. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 19683-19694, 2021.

Tang, R., Li, Z., Jia, Y., Li, C., Chen, K., Sun, X., Lou, J. Evaluating one-and two-source energy balance models in estimating surface evapotranspiration from Landsat-derived surface temperature and field measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 9-10, p. 3299-3313, 2013.

Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., French, A. N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 4, p. 369-384, 2007.

Wang, K., Li, Z., Cribb, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 102, n. 3 – 4, p. 293–305, 2006.

Yao, Y., Liang, S., Yu, J. Chen, J., Liu, S., Lin, Y., Fisher, J. B., Mcvicar, T. R., Cheng, J., Jia, K., Zhang, X., Xie, X., Jiang, B., Sun, L. A simple temperature domain two-source model for estimating agricultural field surface energy fluxes from Landsat images. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 10, p. 5211-5236, 2017.

## 2.3.2 Artigo 2

*Article***Effects of ENSO phenomenon on evapotranspiration flux dynamics in the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil****Felipe Cavallini Crespo <sup>1\*</sup>, Denise Cybis Fontana <sup>2</sup> and Juliano Schirmbeck <sup>3</sup>**<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto;<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia;<sup>3</sup> Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

\* Correspondence: fe\_cavallini@hotmail.com

**Abstract:** This study aimed to analyze the evapotranspiration (LE) flux variability in the state of Rio Grande do Sul - RS (Brazil) associated with ENSO (El Niño Southern Oscillation) events. To do so, LE was considered the residual term of energy balance (EB) components and calculated using the METRIC model, with inputs from MODIS sensor products and ERA5 reanalysis meteorological data from 2002 to 2019. The ENSO events used to confront LE dynamics were defined using the Oceanic Niño Index (ONI). Based on this, within the study period, the periods 2010/2011 and 2015/2016 were defined as years of higher negative and positive anomalies, respectively. Our findings showed that analyses using satellite images and reanalysis data, in addition to helping to understand and dimension LE, also allow delimiting areas where ENSO-associated effects are relevant, providing a significant and original contribution to the understanding of ENSO, especially in a farming context.

**Keywords:** ENOS; MODIS; LE; METRIC.**Citation:** To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Last-name

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



**Copyright:** © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**1. Introduction**

The birthplace of El Niño Southern Oscillation (ENSO) is the equatorial Pacific Ocean. The phenomenon is the main mechanism of interannual climate variability, with foreseeable effects on a global scale (teleconnections). Its driving forces come from ocean-atmosphere dynamics, which associate variations in the intensity of trade winds over the ocean with the displacement of warm surface waters in the equatorial Pacific Ocean, altering the Walker circulation cell. ENSO is characterized by two phases, namely: 1) La Niña: when trade winds and negative sea surface temperature (SST) anomalies intensify; 2) El Niño: when trade winds are weaker than the normal, and SST anomalies are positive [1,2].

In southeastern South America, especially in southern Brazil, the El Niño phase is often associated with increasing rainfall volumes [3,4], the number of rainy days [5], daytime cloudiness [6], and air temperatures [7]. Conversely, the La Niña phase shows, in most events, an inverse pattern. The ENSO phenomenon, therefore, influences one of the main factors related to livestock sector performance in the state of Rio Grande do

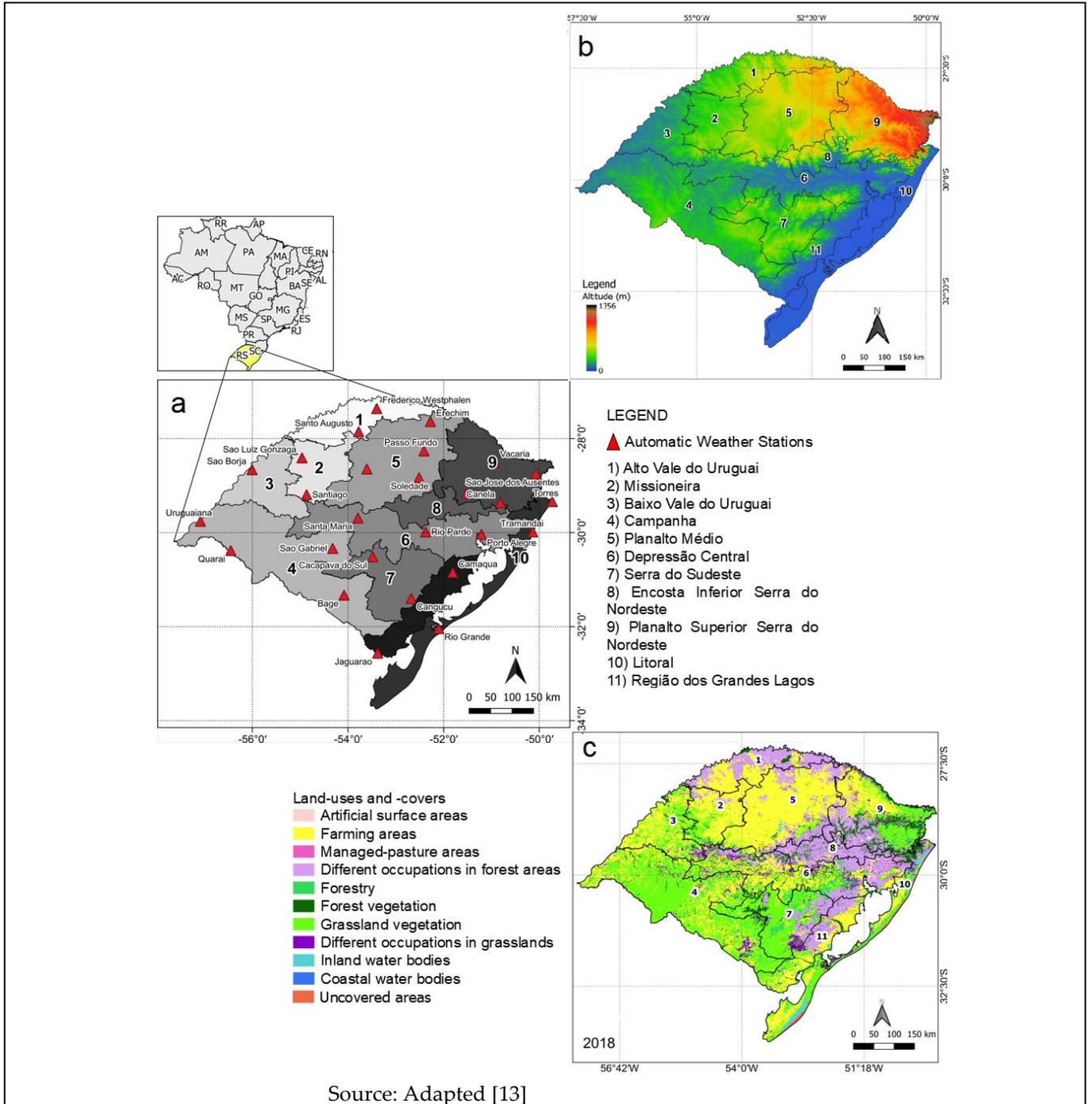
Sul (RS) in Brazil, which is water availability. In the State, water deficits are frequent and represent the most damaging adverse effect, causing significant gaps in livestock sector productivity [8].

A notoriously efficient way to gather surface water information is determining Energy Balance (EB). It expresses the partitioning of energy available on the Earth's surface (radiation balance -  $R_n$ ) into three main components: latent heat flux and/ or evapotranspiration flux (LE), sensible heat flux in the air (H), and heat flux in the soil (G) [9-11]. The METRIC model uses orbital imagery and reanalysis of meteorological data to estimate EB. The model has already been tested for the climatic conditions of the state of RS [12] and proved efficiency in generating LE data with spatial and temporal representation. However, little information is available on the ENSO-associated effect on evapotranspiration in large agricultural production regions in the RS State.

Therefore, knowing that LE is the EB component related to water availability, a key factor for the farming sector, and considering the hypothesis that ENSO influences variability in EB components, this work aimed to analyze the variability in LE in face of the effects of the ENSO phenomenon throughout the state of RS, southern Brazil.

## **2. Materials and Methods**

The study area of this work covered the territory of the state of Rio Grande do Sul (RS) as a whole and, in a later detail, separated its 11 Eco-climatic Regions (Figure 1).



Source: Adapted [13]

**Figure 1.** Study area: a) RS State, Ecoclimatic Regions, and INMET automatic weather stations used for data collection; b) Altitude; and c) Land-uses and -covers within the area.

The EB database used to obtain the LE component was prepared according to the method proposed by [14]. These authors used the METRIC model, with input data from MODIS orbital sensor and ERA-Interim reanalysis, they obtained values of EB components ( $R_n$ ,  $H$ ,  $G$ , and  $LE$ ) every 8 days between 2002 and 2016. In this study, the dataset was updated, replacing ERA-Interim data with the new ERA5 project data. The MODIS MCD43B3 product, referring to the albedo, was also replaced with the MCD43A3 product, due to discontinuity in the data supply of the previously used product.

ERA5 data was obtained from the Copernicus Climate Change Service website: (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), and MODIS data were obtained from the NASA Earth data website (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>).

EB components were calculated based on equation 1, which considers only the main components.

$$R_n + G + H + LE \approx 0$$

The radiation balance was calculated using equation 2.

$$R_n = RG\downarrow(1-\alpha) + \epsilon S \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon S \sigma T_s^4$$

Wherein:  $RG\downarrow$  is the global solar radiation ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ),  $\alpha$  is the surface albedo (dimensionless),  $\epsilon S$  is the emissivity of the surface (dimensionless),  $\epsilon_a$  is the emissivity of the atmosphere (dimensionless),  $\sigma$  is the Stefan Boltzmann's constant ( $4.9 \times 10^{-9}\ MJ\ m^{-2}\ K^{-4}\ day^{-1}$ ),  $T_a$  is the air temperature (K), and  $T_s$  is the surface temperature (K).

G was obtained through Equation 3 [15].

$$G = [(T_s - 273.15) \times (0.0038 + 0.0074\alpha) \times (1 - 0.98\ NDVI)] \times R_n$$

Wherein:  $T_s$  is the surface temperature (K),  $\alpha$  albedo of the surface (dimensionless), and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (dimensionless).

The estimate of H followed equation 4 [15].

$$H = \rho_a r C_p (dT/rah)$$

Wherein:  $\rho_a$  air density ( $Kg.m^{-3}$ ),  $C_p$  the specific heat of air at constant pressure ( $J.kg^{-1}.k^{-1}$ ),  $rah$  air resistance between two close surfaces at different heights ( $s.m^{-1}$ ), and  $dT$  temperature difference between two nearby surfaces of different heights (K).

LE was obtained as a residual term, transforming Equation 1 into Equation 5.

$$LE = R_n - G - H$$

In short, obtaining each EB component, according to the equations above, relies on the data and sources in Table 1.

**Table 1.** Data used to calculate Energy Balance (EB) components.

Sources / EB components	R <sub>n</sub>	G	H	LE
MODIS products	MOD11A2 (1 km, 8 days)	MOD11A2 (1 km, 8 days)	MOD11A2 (1 km, 8 days)	MOD11A2 (1 km, 8 days)
	MCD43A3 (500 m, 16 days)	MCD43A3 (500 m, 16 days)	-	MCD43A3 (500 m, 16 days)
	-	MOD13A2 (1 km, 16 days)	-	-
	-	-	MOD15A2 (500 m, 8 days)	-

ERA5 data	Global solar radiation	-	-	-
	Air temperature	-	Air temperature	Air temperature
	-	-	Wind speed	Wind speed
	-	-	-	Dew point temperature

Source: The own author.

ERA5 data averages were also calculated every 8 days and converted into a cloud of points, considering the central coordinate of the pixel region. It was followed by an interpolation using the kriging method of the ERA5 data to make it compatible with MODIS data temporal and spatial resolution.

The ENSO events were characterized using Niño Oceanic Indexes (ONI), extracted from the 2020 NOAA dataset (Figure 2). The El Niño phase stands for positive anomalies of above 0.5 °C for five consecutive quarters, while the La Niña phenomenon is the opposite, with negative anomalies below -0.5 °C for five consecutive quarters.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8
2019	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	0.5

Source: Adapted from [16].

**Figure 2.** Oceanic Niño Index (ONI), with occurrences of El Niño (in red), and La Niña (in blue) events from 2002 to 2019.

The historical series analyzed highlights the years 2010/2011 and 2015/2016 for having a greater intensity of La Niña and El Niño, respectively. These years were used in our study to analyze LE variability in the face of the effects of the ENSO phenomenon.

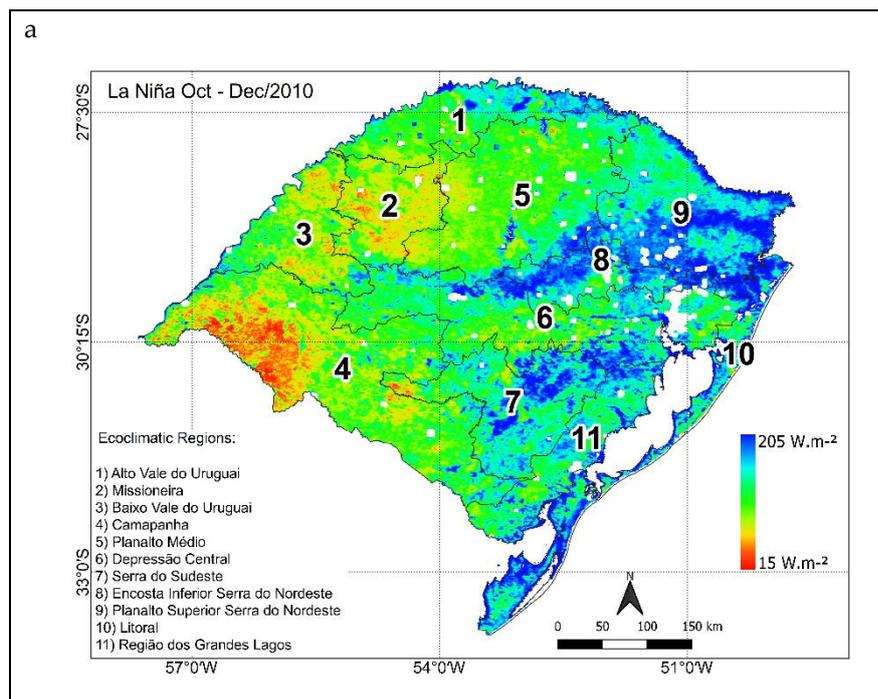
Analysis was performed by building maps with mean LE values of the two selected ENSO events. These correspond to the quarter of October, November, and December, which was when ENSO-associated effects reached a peak in the state of RS [4]. Boxplots were also made to represent LE variability in both events. In the maps, LE averages were represented in each pixel, covering the entire State. On the other hand, in the boxplots, the analysis was made for each of the 11 Ecoclimatic Regions (ERs).

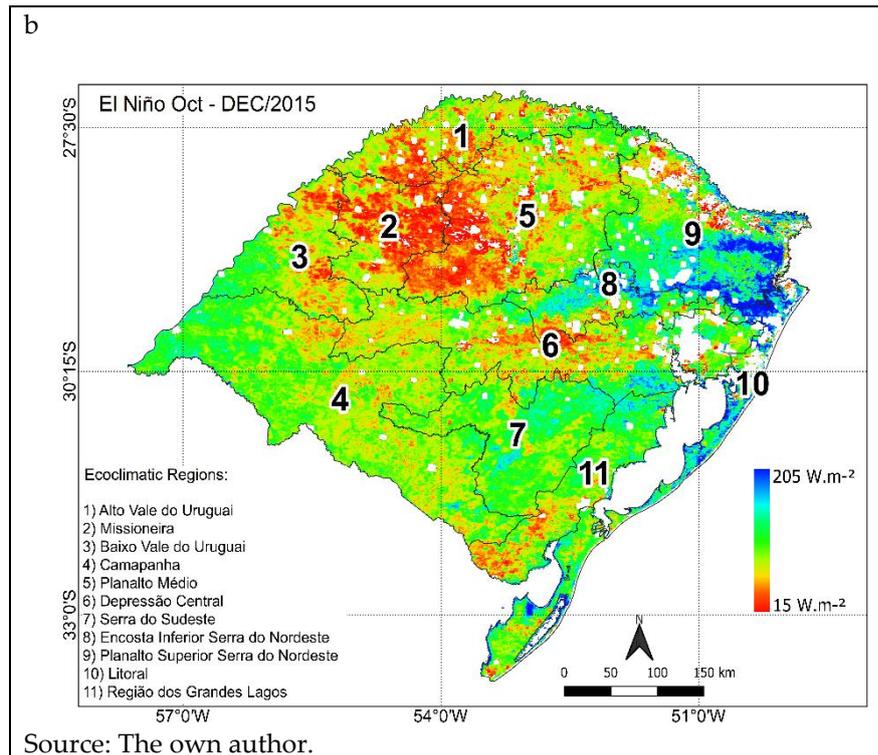
The meteorological variables rainfall, relative humidity, air temperature, and global solar radiation from automatic stations distributed in the RS State were also evaluated (Figure 3). Meteorological data provided by the National Institute of Meteorology (Inmet) were used to interpret results, associating meteorological traits with ENSO phases. From these variables, reference evapotranspiration was calculated, using the Penman-Monteith equation, to represent atmospheric evaporative demands during ENSO events.

### 3. Results

LE distribution maps (Figure 4) show important differences, both within the State and between both selected events. In most of the RS territory, LE was higher in La Niña 2010/2011 than in El Niño 2015/2016.

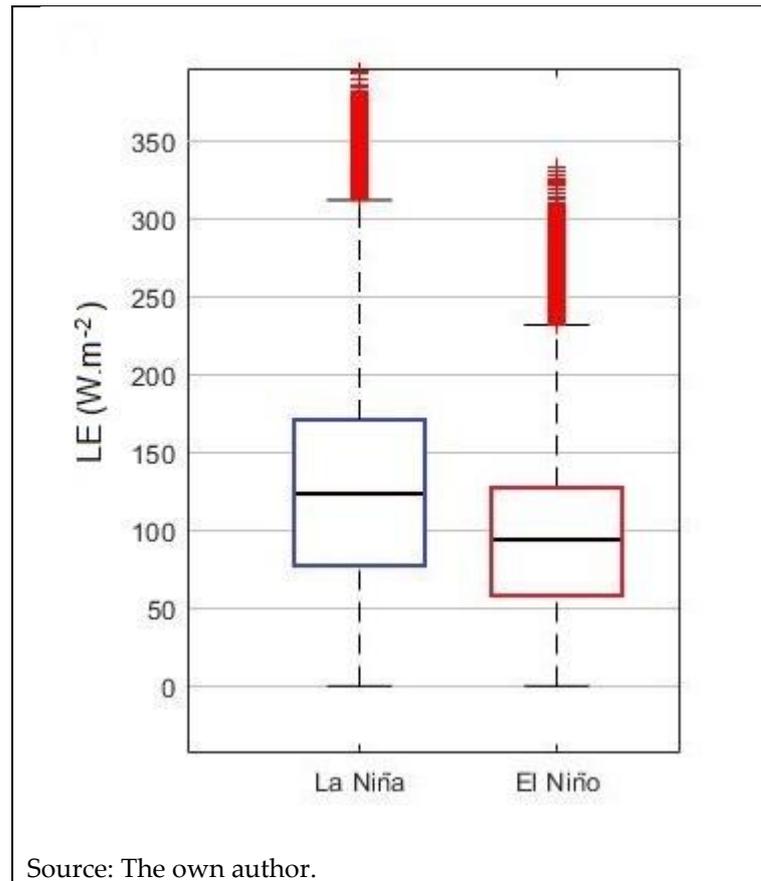
In El Niño 2015/16 (Figure 4b), the lowest LE values were found in farming areas (Figure 1c), especially in the northern State, Central Depression, and southern State, close to Lagoa Mirim. All of them are areas with intense farming and that, at the time, were grown with summer crops. In natural vegetation or planted forest areas in RS (Figure 1c), the highest LE values were observed in both events, especially in La Niña 2010/11 (Figure 4a). In this event, there were low LE values in the Campanha region, wherein shallow soils with little water-storage capacity predominate.





**Figure 3.** Map of the state of Rio Grande do Sul with averages of evapotranspiration flux (LE) for the quarter of October/November/December in the events: (a) La Niña 2010/2011 and (b) El Niño 2015/2016.

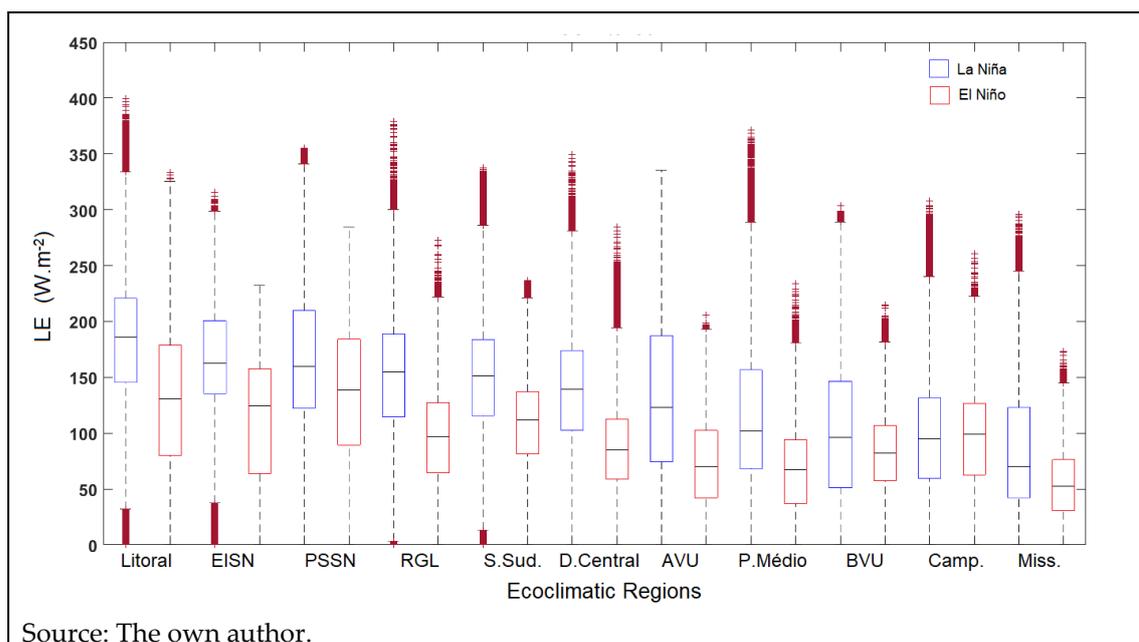
The boxplot in Figure 5 shows LE variability during the ENSO events under analysis, considering all pixels covering the RS State. There was greater variability (longer boxplot length) and superiority (higher boxplot) in LE values during the La Niña 2010/11. In this phase, 75% of the image pixels had LE values between 80 and 170 W.m<sup>-2</sup>. On the other hand, in the El Niño 2015/16 event, the observed LE values were lower, with 75% of the pixels showing LE values between 60 and 120 W.m<sup>-2</sup>. The boxplots in Figure 6 highlight that this pattern was consistent throughout the entire territory of RS, and, in all ERs, higher values were observed and had greater variability during the La Niña 2010/11 compared to the event El Niño 2015/16.



**Figure 4.** Boxplots of evapotranspiration flux (LE –  $W.m^{-2}$ ) in the quarter of October/ November/ December for the phases La Niña (2010/2011) and El Niño (2015/2016). Horizontal lines inside boxes represent the percentile 50 (median), the end of the boxes the percentiles 25 and 75, bars the percentiles 10 and 90, and red crosses the outliers.

As a result of such a data distribution pattern, LE averages were higher during the La Niña 2010/2011 for all 11 ERs (Table 2). For the whole State, there was a difference of 40  $W.m^{-2}$  between events, with the average in La Niña being 135  $W.m^{-2}$  and in El Niño of 95  $W.m^{-2}$ . In both events, the regions Coastline (Litoral), Serra do Nordeste Upper Plateau (Planalto Superior Serra do Nordeste), and Lower Slope of Southeastern Highlands (Encosta Inferior da Serra do Sudeste) had averages superior to those of the other regions, Therefore, the ENSO phenomenon may change LE magnitude, but its spatial distribution is maintained, as characterized by [18]. The higher LE observed in these regions was a consequence of greater water supply (rainfall) and lower atmospheric evaporative demand, which are largely defined by their geographic location, mainly altitude (Figure 1b).

Still regarding LE variability in the State, when comparing the estimate of the ERs, but considering a deviation from the average of each event, most of the regions showing LE values higher than the average were the same in both events. It reinforces, therefore, the thesis of dependence on geographic factors and also on land use and cover for LE spatial distribution along the State.



**Figure 5.** Boxplots of evapotranspiration flux (LE – W.m-2) in the quarter of October/ November/ December for the phases La Niña (2010/2011) and El Niño (2015/2016) in the Bioclimatic Regions of Rio Grande do Sul State. Horizontal lines inside boxes represent the percentile 50 (median), the end of the boxes the percentiles 25 and 75, bars the percentiles 10 and 90, and red crosses the outliers.

**Table 2.** LE averages (W.m-2) in the quarter of October/ November/ December for the phases La Niña (2010/2011) and El Niño (2015/2016) in the Bioclimatic Regions of Rio Grande do Sul State, Brazil.

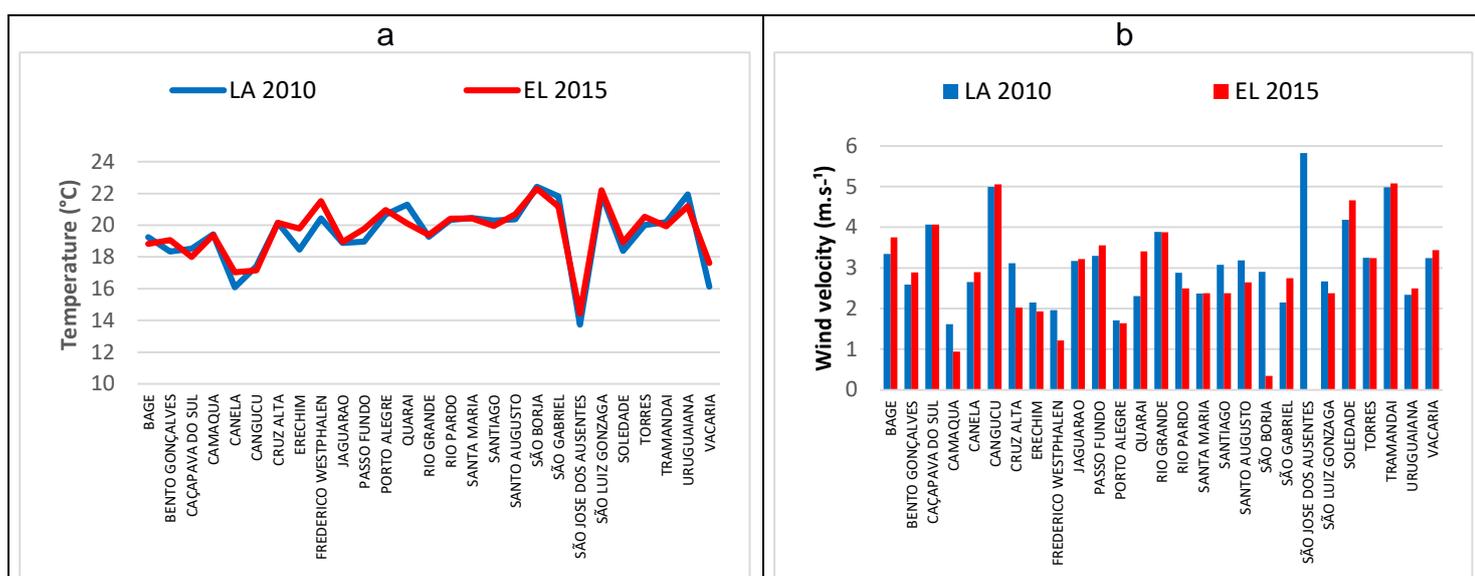
Ecoclimatic Region	La Niña OND/10	El Niño OND/15	DIF (LN-EN)	% of MEAN LN	% of MEAN EN
<i>Alto Vale do Uruguai</i>	131	74	57	0.97	0.78
<i>Missioneira</i>	86	55	31	0.63	0.58
<i>Baixo Vale do Uruguai</i>	102	83	19	0.75	0.87
<i>Campanha</i>	97	95	2	0.72	1.00
<i>Planalto Médio</i>	117	68	49	0.86	0.71
<i>Depressão Central</i>	139	88	51	1.03	0.93
<i>Serra do Sudeste</i>	148	108	41	1.10	1.13
<i>Encosta Inf Serra do Sudeste</i>	168	114	54	1.24	1.20
<i>Planalto Sup Serra do Nordeste</i>	169	134	35	1.25	1.41
<i>Litoral</i>	182	130	52	1.35	1.37
<i>Região dos Grandes Lagos</i>	149	97	52	1.10	1.02
<i>Mean</i>	135	95	40		

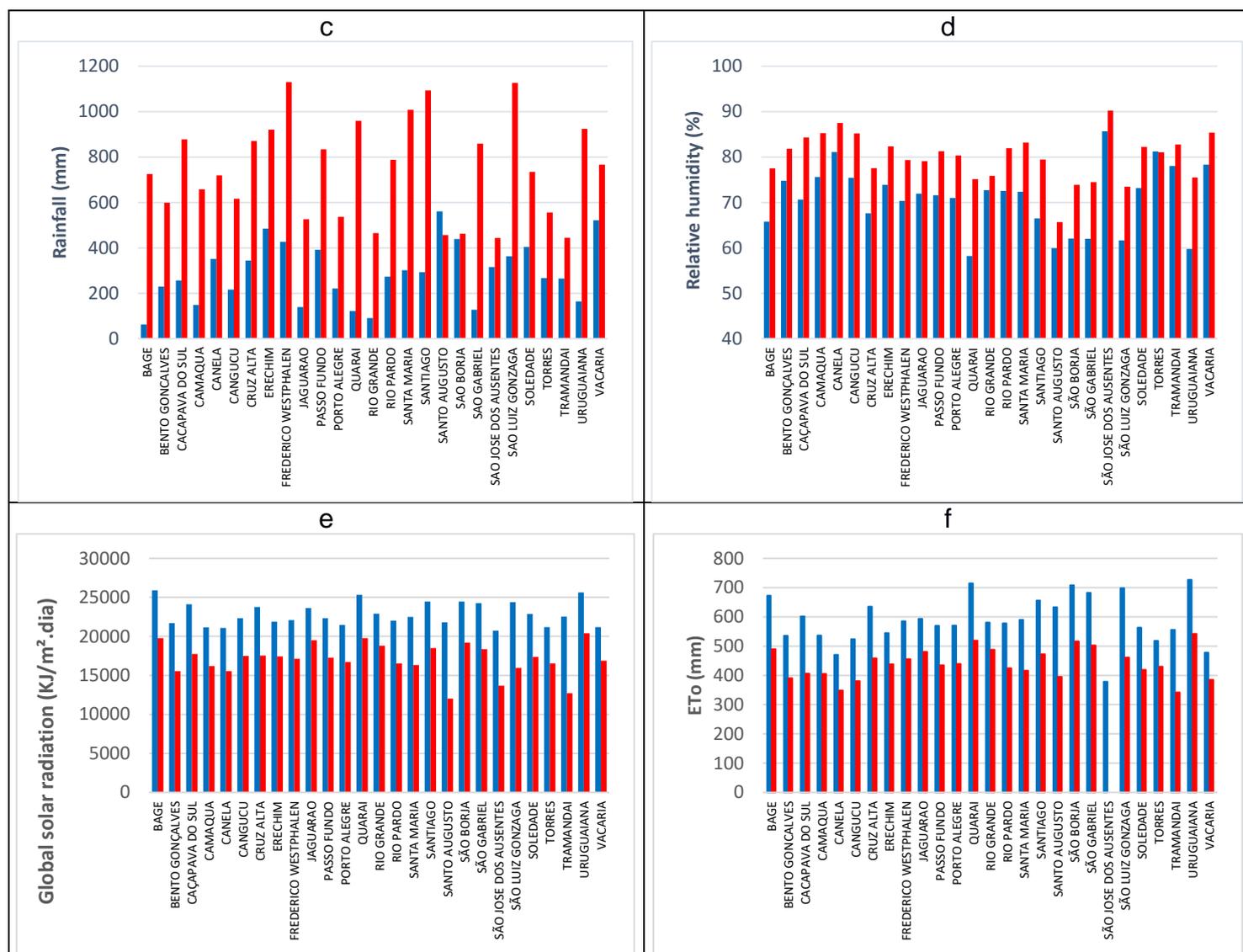
Source: The proper author.

Differences in LE values between both events are related to the already known meteorological changes in the RS State associated with the ENSO events. The lower LE values found during the El Niño 2015/2016 may have been a consequence of an increase in rainfall [4], with greater cloudiness [6], decreasing global solar radiation incidence on the Earth's surface and hence lower net radiation and atmospheric evaporative demand (ET<sub>o</sub>). In addition, increasing rainfall can raise atmospheric humidity, which has an inverse relationship with evapotranspiration [19].

During the two ENSO events, in most of the sites in RS, meteorological elements measured at surface stations showed a coherent pattern to the expected (Figure 7) and described above, corroborating the results found. In the events of 2010/2011 and 2015/2016, average air temperature (Figure 7a) and wind speed (Figure 7b) showed similar values. However, in El Niño 2015/2016, there was more rainfall (Figure 7c) and less atmospheric evaporative demand (Figure 7f) compared to La Niña 2010/2011. It was a consequence of the lower global solar radiation (Figure 7e) and higher relative air humidity (Figure 7d).

These findings are corroborated by [20], who used measures from a flux tower installed on native grasslands in Santa Maria – RS. The author also noted a trend of higher LE values during La Niña events, as a consequence of higher atmospheric evaporative demand. When analyzing different ENSO events, the same author brought to light the fact that the ratio  $E_{Tr}/E_{To}$  (real evapotranspiration to potential evapotranspiration) can be changed as a function of the event intensity. In a strong La Niña event analyzed by the author (2020/21), with a significant reduction in water supply, the ratio was also reduced, therefore, evapotranspiration flow can be restricted due to high water availability in the soil. Yet, in a weak La Niña event analyzed (2017/18), the ratio  $E_{Tr}/E_{To}$  was higher, denoting water restriction; therefore, in this case, the magnitude of flux was a consequence of an intense atmospheric evaporative demand.





**Figure 6.** Data on (a) mean air temperature, (b) mean wind speed, (c) cumulative rainfall, (d) mean relative humidity, (e) daily global solar radiation, and (f) evapotranspiration from cumulative reference (ETo) for the quarter October/ November/ December, obtained from automatic stations installed on the Rio Grande do Sul State during the La Niña 2010/2011 and El Niño 2015/2016

Evapotranspiration is known to be an extremely complex process resulting from conditions in the continuous soil-plant-atmosphere. In El Niño 2015/2016, meteorological changes determined a lower evaporative demand (ETo), thus lower LE, even with a higher moisture content on the surface (higher rainfall). The opposite was found in La Niña 2010/2011. Even under lower rainfall, the higher evaporative demand increased LE values. This fact can be explained by the humid subtropical climate conditions that predominate in the RS State, which can provide water to the evapotranspiration process even in drier periods.

The magnitude of the ETr/ ETo ratio will indicate adequate water conditions for crops. So much so that, in the Agricultural Zoning of Climate Risk (ZARC, acronym in Portuguese), which is one of the major planning tools in the agricultural sector, methods are based on determining water-requirement satisfaction index (WRSI, as ETr/ETo) and, based

on it, on the frequency of adverse events that seriously affect or prevent crop development, growth or satisfactory productivity. Thus, further studies should focus on converting LE, expressed in evapotranspiration flux ( $W.m^{-2}$ ) to ETr, into the head of water (mm), so that the ratio ETr/ETo can be estimated to verify water condition suitability in such adverse events. When ETo data come from surface weather stations, attention should be paid to the fact that they will be obtained from points (weather stations), while ETr data will come from the area covered by the pixels.

ENSO events can be quite variable in terms of sea surface temperature anomalies in the Equatorial Pacific Ocean, as well as regarding anomalies associated with the phenomenon in meteorological elements in the RS State, or even in different regions of the State. But the events analyzed in this study were of strong intensity and may indicate a consistent trend to be expected when ENSO events are present. In an individual event, however, different results from those characterized in this work can be observed, which reinforces the need to continue this study to obtain an LE climatology associated with ENSO.

#### 4. Discussion

Evapotranspiration flux varies with the phase of the ENSO phenomenon, therefore, there is a complex relationship between soil-plant-atmosphere components that define the LE process.

Atmospheric evaporative demand (ETo) is a key factor to determine LE magnitude in most of the RS territory for both ENSO phases. During La Niña, even with lower rainfall, higher ETo determines the occurrence of higher LE values. In El Niño, even under greater rainfall, LE is lower due to lower ETo.

But although important, LE is not determined only by ETo. In both ENSO phases, the highest LE values occur in the Ecoclimatic Regions located in the northeast portion of the RS State, where rainfall is higher and ETo is lower.

Satellite imagery analysis helps understand and dimension LE and delimit areas within which ENSO-associated effects become relevant. Therefore, it is an important and original contribution to the understanding of the phenomenon, especially in an agricultural context.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Fedorov, A. V., Hu, S., Lengaigne, M., Guilyardi, E. The impact of westerly wind bursts and ocean initial state on the development, and diversity of El Niño events. *Climate Dynamics*, v. 44, n. 5-6, p. 1381-1401, 2014.
2. Fan, J., Meng, J., Ashkenazy, Y., Havlin, S., Schellnhuber, H. J. Network analysis reveals strongly localized impacts of El Niño. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, n. 29, p. 7543-7548, 2017.
3. Puchalski, L. A. Efeitos associados ao El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e no déficit hídrico no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, v. 83, 2000.
4. Matzenauer, R., Radin, B., Maluf, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. *Agrometeoros*, v. 25, n. 2, 2018.
5. Fontana, D. C., Almeida, T. S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.10, n.1. p.135-141. 2002.
6. Custodio, M. S. Índice de nebulosidade diurna do estado do Rio Grande do Sul: climatologia e impactos do El Niño Oscilação Sul. *Ciência e Natura*, 38(1): 382-392, 2016.
7. Guimarães, D. P., Reis, R. Impactos do fenômeno Enos sobre a temperatura no Brasil. *Revista Espinhaço UFVJM*, p. 34-40, 2017.
8. Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., Nendel, C., The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science* 153, 1394-1411, 2015.
9. Bowen, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical review*, v. 27, n. 6, p. 779, 1926.
10. Wang, K., Li, Z., Cribb, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment*, v. 102, n. 3-4, p. 293-305, 2006.
11. Timmermans, W. J., Kustas, Q. P., Anderson, M. C., Fench, A. N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*, v. 108, n. 4, p. 369-384, 2007.
12. Schirmbeck, J., Fontana, D. C., Roberti, D. R., Schirmbeck, L. W. Energy balance from images in humid climate – SEBAL and METRIC. *Agrometeoros*, 25(2), 2017.
13. IBGE. [banco de dados] - <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>> Acesso em 10 jan. 2021.
14. Schirmbeck, J., Fontana, D. C., Ruhoff, A. L., Roberti, D. R., Schirmbeck, L. W. Methodology of spatialization of energy balance components using MODIS and ERA Interim data. *Revista Ciência Agronômica*, v. 51, n. 4, p. 1-11, 2020.
15. Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
16. NOAA - [banco de dados] <[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)> Acesso em: 20 ago. 2020.
17. Crespo, F. C. Distribuição espaço-temporal do fluxo evapotranspirativo no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rio Grande do Sul, Brasil, p. 88, 2022.
18. Ismael Filho, A., Borges, P. D. F., Araújo L. D. S., Pereira, A. R., Lima, E. D., Silva, L. D. S., Santos Junior, C. D. Influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração. *Gaia Scientia*, v. 9, n. 1, p. 62-66, 2015.
19. Lobato, R. R. C. Variabilidade dos fluxos de energia e evapotranspiração sob influência do ENOS no bioma Pampa brasileiro. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul. 2022.

### 3 CONCLUSÕES

No presente estudo foram analisados os padrões espaço-temporais de LE no RS, obtidos de uma série histórica de 18 anos, obtida com o modelo METRIC, em que os dados de entrada foram provenientes de imagens MODIS e dados de reanálise ERA5.

A dissertação consta de dois artigos, em que no artigo 1 foi utilizada toda a série histórica disponível e se objetivou analisar os padrões médios e a variabilidade de LE (fluxo evapotranspirativo), obtido a partir do modelo METRIC para o Rio Grande do Sul, a fim de obter informações da condição hídrica com maior detalhamento espaço-temporal do que atualmente é disponível. As conclusões foram:

Os padrões de distribuição espacial de LE observados no RS evidenciam a complexa associação entre a oferta hídrica e a demanda evaporativa da atmosfera, salientando-se ainda que o tipo de solo, o uso e cobertura da terra, e o relevo são condicionantes deste padrão. Os maiores valores de LE ocorrem nas florestas da porção de terras altas do nordeste do RS, enquanto que os menores valores predominam nas regiões de solos rasos e planos do oeste do RS. Considerando os valores médios de LE das Regiões Ecoclimáticas, verifica-se que há diferenças entre as regiões, com a formação de quatro grupos similares.

Há diferenças em LE ao longo do ano. A variabilidade dos padrões de LE está associada ao caráter de clima subtropical úmido característico do RS. Dado a não ocorrência de estação seca, é a variação na demanda evaporativa da atmosfera que determina a sazonalidade observada em LE. Verão é quando ocorrem os maiores valores de LE, enquanto que no inverno os valores decrescem. Em todos os meses do ano, a variabilidade espacial, no território do Estado, é similar ao padrão médio, mudando somente a magnitude dos valores em cada período. Mas, mesmo com esta marcada sazonalidade em LE, existem diferenças nos padrões temporais (variação em LE ao longo do ano) entre as regiões.

Os resultados gerados neste trabalho, mostrando os padrões médios e a variabilidade em LE no território do Estado e ao longo dos meses do ano, com alto detalhamento espacial, são inéditos e podem ser utilizados para subsidiar análises de risco no setor agropecuário.

No artigo 2 foram selecionados 2 eventos fortes, um de El Niño (2015/16) e outro de La Niña (2010/2011) com o objetivo de analisar a variabilidade em LE frente aos efeitos do fenômeno ENOS em toda a extensão do RS. Como conclusões tem-se:

O fluxo evapotranspirativo é distinto conforme a fase do fenômeno ENOS, evidenciando a complexa relação entre os componentes solo-planta-atmosfera que definem o processo de LE.

A demanda evaporativa da atmosfera (ET<sub>o</sub>) é o fator chave na determinação da magnitude do fluxo de LE na maior parte do território do RS em ambas fases do ENOS. Na La Niña, mesmo com menor precipitação pluvial, é a maior ET<sub>o</sub> que determina a ocorrência de maiores valores de LE. Na fase El Niño, mesmo havendo maior precipitação pluvial, LE é menor em função da menor ET<sub>o</sub>.

Mas apesar de importante, LE não é determinada somente pela ET<sub>o</sub>. Em ambas fases do ENOS os maiores valores de LE ocorrem nas Regiões Ecoclimáticas situadas na porção nordeste do RS, onde a precipitação pluvial é maior e a ET<sub>o</sub> é menor.

As análises usando imagens de satélite permitem, além de auxiliar na compreensão e dimensionamento de LE, também delimitar áreas em que os efeitos associados ao ENOS se tornam relevantes, gerando uma contribuição importante e original ao entendimento do fenômeno, especialmente no contexto agropecuário.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos a partir da série histórica de LE gerada com um modelo que mostra adequação às condições climáticas do RS são inéditos e abrem espaço para uma gama de análises e estudos sobre a evapotranspiração do Estado. Estas informações são de grande relevância, dado que a condição hídrica é o principal fator, no setor agropecuário, limitante à obtenção de maiores produtividades.

Recomenda-se nas análises futuras a conversão dos dados de LE ( $W.m^{-2}$ ) para dados expressos em altura de água (mm por dia) de forma a permitir o cálculo do ISNA e análises de risco de ocorrência de situações adversas.

Há a possibilidade de implementar outras análises estatísticas considerando por exemplo a variabilidade de LE entre ciclos de cultivos.

Ainda, poderiam ser analisados os dados de LE frente a outros anos de ocorrência do ENOS, com diferentes intensidades, como também os padrões de LE frente a outros eventos, por exemplo entrada de frentes frias, ciclones extratropicais e estiagens.

Assim como os resultados encontrados neste trabalho, as análises complementares sugeridas visam criar subsídios para implementar ações para um aumento na produtividade dos cultivos a partir de conhecimentos mais detalhados a respeito da complexidade de processo evapotranspirativo em escalas espaciais grandes, como a do estado do RS

## REFERÊNCIAS

- ADAMATTI, D. S., RUHOFF, A. L., ROCHA, H. R. Sensibilidade do algoritmo de evapotranspiração modis aos dados de entrada meteorológicos em biomas tropicais. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis**, 2017.
- AGUILAR, A. L., FLORES, H., CRESPO, G., MARÍN, M. I., CAMPOS, I., CALERA, A. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico. **Water**, v. 10, n. 7, p. 901, 2018.
- ALLEN, R., IRMAK, A., TREZZA, R., HENDRICKX, J. M. H., BASTIAANSEN, W., KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 4011–4027, 2011.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M. Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- APARECIDO, L. E. O., ROLIM, G. D. S., MORAES, J. R. D. S. C., TORSONI, G. B., MENESES, K. C. D., COSTA, C. T. S. Acurácia da Reanálise ERA-Interim do ECMWF e sua Aplicação na Estimativa da Deficiência Hídrica no Estado do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 4, p. 515-528, 2019.
- ATLAS Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)**. WREGG, M.S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA, I.R. (ed.). 333p, 2012.
- BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação na Universidade de Agricultura, Wageningen, Países Baixos, p. 288. 1995
- BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R. A., HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Journal of Hydrology**, 212 – 213, 1998.
- BECKER, E. L. S., MÁRCIA, N. P. Relevo do Rio Grande do Sul, Brasil, e sua representação em maquete. **Revista Percursos**, v. 4, n. 2, p. 113-132, 2012.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical review**, v. 27, n. 6, p. 779, 1926. 81

BROWNE, P. A., DE ROSNAY, P., ZUO, H., BENNETT, A., DAWSON, A. Weakly coupled ocean-atmosphere data assimilation in the ECMWF NWP system. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, p. 234, 2019.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. **Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE**, 1998.

CUNHA, G. R., BARNI, N. A., HAAS, J. C., MALUF, J. R. T., MATZENAUER, R., PASINATO, A., PIMENTEL, M. B. M., PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo**, v. 9, n. 3, (Nº Especial Zoneamento Agrícola), p. 446 – 459, 2001a.

CUNHA, G. R., HAAS, J. C., MALUF, J. R. T., CARAMORI, P. H., ASSAD, E. D., BRAGA, H. J., JR, J. Z., LAZZAROTTO, C., GONÇALVES, S., WREGE, M., BRUNETTA, D., DOTTO, S. R., PINTO, H. S., BRUNINI, O., THOMÉ, V. M. R., ZAMPIERI, S. L., PASINATO, A., PIMENTEL, M. B. M., PANDOLFO, C. Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo**, v. 9, n. 3, (Nº Especial Zoneamento Agrícola), p. 400 – 414, 2001b.

CUNHA, G. R., PAULA, J. D., BERGAMASCHI, H., SAIBRO, J. D., BERLATO, M. A. Balanço de radiação em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 1993.

CUSTODIO, M. S. Índice de nebulosidade diurna do estado do Rio Grande do Sul: climatologia e impactos do El Niño Oscilação Sul. **Ciência e Natura**, 38(1): 382-392, 2016.

DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ANDRADE, U., BALMASEDA, M. A., BALSAMO, G., BAUER, P., BECHTOLD, P., BELJAARS, A. C. M., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., DELSOL, C., DRAGANI, R., FUENTES, M., GEER, A. J., HAIMBERGER, L., HEALY, S. B., HERSCBACH, H., HOLM, E., ISAKEN, L., KALLBERG, P., KOHLER, M., MATRICARDI, M., MCNALLY, A. P., MONGE-SANZ, B. M., MORCLETTE, J. J., PARK, B. K., PEUBEY, C., ROSNAY, P., TAVOLATO, C., THEPAUT, J. N., VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

DE SANTOS, K., DE PAULA SOUZA, R. J., DA SILVA, B. C. S., PONTES, A. N., MORALES, G. P. Uso de geotecnologias para identificação de ilhas de calor no município de Belém (PA). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 8, p. 178-186, 2018.

DI GIUSEPPE, F., TOMPKINS, A. M. Potential to use seasonal climate forecasts to plan malaria intervention strategies in Africa. **ECMWF Newsletter**, v. 140, p. 15-20, 2014.

DIDAN, K., MUNOZ, A. B., SOLANO, R., HUETE A. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)**. v. 3. 2015. 82

**ERA5** – [banco de dados] <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>> Acesso em: 20. Abr. 2020.

DINIZ, R. R. S. **Modelos SEBAL e METRIC para estimativa da evapotranspiração da cultura da banana irrigada**. 2021. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil 2021.

FEIX, R. D., LEUSIN JÚNIOR, S. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul — 2019**. Porto Alegre: SEPLAG, Departamento de economia e estatística, 2019.

FONTANA, D. C., ALMEIDA, T. S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1. p.135-141. 2002.

FONTANA, D. C., PINTO, D. G., JUNGES, A. H., BREMM, C. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. *Bragantia* (São Paulo, SP. Eletrônico), v. 74, 2015.

FRENCH, A. N., HUNSAKER, D. J., THORP, K. R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 281-294, 2015.

GLANTZ, M. H., RAMIREZ, I. J. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to enhance societal readiness for El Niño's impacts. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 11, n. 3, p. 394-403, 2020.

**Golden Gate Weather Services**. Disponível em: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso 10/02/2022.

GUIMARÃES, D. P., REIS, R. Impactos do fenômeno Enos sobre a temperatura no Brasil. **Revista Espinhaço| UFVJM**, p. 34-40, 2017.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HORÁNYI, A., SABATER, J. M., NICOLAS, J., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., DEE, D. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. **ECMWF Newsl**, v. 159, p. 17-24, 2019.

**IBGE**. [banco de dados] - <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>> Acesso em 10 jan. 2021.

JAKOB, A. A. E. A krigagem como método de análise de dados demográficos. **Anais XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais**, Ouro Preto – Minas Gerias, p. 1-21, 2016.

KUINCHTNER, A., BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2016.

L3HARRIS. **L3 Harris Geospatial Product Brochures**. Disponível em: <https://www.harrisgeospatial.com/Learn/Brochures>. Acesso em: 20 fev. 2020.

LATORRE, M., ANDERSON, L. O., SHIMABUKURO, Y. E., DE CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Revista Espaço e Geografia**, v. 6, n. 1, 2003. 83

LEES, K. J., QUAIFE, T., ARTZ, R. R. E., KHOMIK, M., CLARK, J. M. Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review. **Science of the total environment**, v. 615, p. 857-874, 2018.

LI, T., ZHANG, L., MURAKAMI, H. Strengthening of the Walker circulation under globalwarming in an aqua-planet general circulation model simulation. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 32, n. 11, p. 1473-1480, 2015.

LINDSEY, R., HERRING, D. **MODIS Brochure**. Disponível em: [https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis\\_brochure.pdf](https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis_brochure.pdf). Acesso em: 21 mai. 2021.

LOBATO, R. R. C. **Variabilidade dos fluxos de energia e evapotranspiração sob influência do ENOS no bioma Pampa brasileiro**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul. 2022.

MACHADO, N. G., BIUDES, M. S., ANGELINI, L. P., MÜTZENBERG, D. M. S., NAS-SARDEN, D. C. S., BILIO, R. S., NOGUEIRA, J. S. Sazonalidade do balanço de energia e evapotranspiração em área arbustiva alagável no pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 82-91, 2016.

MATOS, R. C. M. **Uso de imagens MODIS no mapeamento de bacias hidrográficas**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2009.

MATZENAUER, R., MALUF, J. R. T., RADIN, B. **Regime de chuvas e produção de grãos no Rio Grande do Sul: impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2020. 133 p. il. color. E-book.

MATZENAUER, R., RADIN, B., MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, 2018.

MENGUE, V. P., FONTANA, D. C., SILVA, T. S. DA ; ZANOTTA, D., SCOTTÁ, F. C. Methodology for classification of land use and vegetation cover using MODIS-EVI data. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 812-818, 2019.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 10 Jun. 2020

MORAES, E., SILVA, N. D. F., de MOURA, M. S. B., OLIVEIRA, B., & CARVALHO, H. D. S. Avaliação da acurácia do albedo do MODIS para a cultura de cana-de-açúcar no Nordeste. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19., 2019, Santos. Anais. São José dos Campos: INPE, 2019., 2019.

MOREIRA, A., FONTANA, D. C., KUPLICH, T. M., CARDOSO, M. A. Dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com Índices de Vegetação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 4, p. 1409-1436, 2018.

MOURA, M. A. L., QUERINO, C. A. S. Variação sazonal do fluxo de calor no solo dentro de um manguezal tropical. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 3, 2010. 84

MU, Q., ZHAO, M., RUNNING, S. W. MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3) collection 5. **NASA Headquarters**. 2013.

**NASA EARTHDATA** – [banco de dados] <<https://search.earthdata.nasa.gov/search>> Acesso em: 15 nov. 2019.

PEZZI, Luciano Ponzi; SOUZA, Ronald Buss de; QUADRO, Mário FL. Uma revisão dos processos de interação oceano-atmosfera em regiões de intenso gradiente termal do oceano atlântico sul baseada em dados observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 428-453, 2016.

PILAU, F. G., BATTISTI, R., DALMAGO, G. A. Requerimento de irrigação suplementar e eficiência climática para a cultura da soja no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 26, n. 2, 2020.

**PROJETO MAPBIOMAS** – Coleção v. 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em 22 mai. 2021.

PUCHALSKI, L. A. Efeitos associados ao El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e no déficit hídrico no Estado do Rio Grande do Sul. **Porto Alegre: UFRGS**, v. 83, 2000.

RADIN, B., MATZENAUER, R., MELO, R. W. de, WREGE, M. S., STEINMETZ, S. Quantificação e distribuição sazonal da precipitação pluvial nas regiões ecoclimáticas do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1161-1169, 2017.

RUDORFF, B. F. T., SHIMABUKURO, Y. E., CEBALLOS, J. C. O sensor MODIS e suas aplicações no Brasil. [s.l.] **Editora Par{ê}ntese**, 2007.

RUHOFF, A. L., ARAGAO, L. E., COLISCHONN, W., ROCHA, H. R., MU, Q., RUNNING, S. MOD16: Desafios e limitações para a estimativa global de evapotranspiração. Anais **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, INPE p. 5124. 2011.

RUNNING, S., MU, Q., ZHAO, M. MORENO, A. *MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006* [Data set]. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>.

SALLEH, S. A., LATIF, Z. A., MOHD, W. M. N. W., CHAN, A. Air quality parameters dependency of remotely-sensed albedo. In: **2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications**. IEEE. p. 373-377. 2012.

SANCHEZ, J. M., KUSTAS, W. P., CASELLES, V., ANDERSON, M. C. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. **Remote sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 1130-1143, 2008.

SCHIRMBECK, J., FONTANA, D. C., ROBERTI, D. R., SCHIRMBECK, L. W. Energy balance from images in humid climate – SEBAL and METRIC. **Agrometeoros**, 25(2), 2017. 85

SCHIRMBECK, J., FONTANA, D. C., ROBERTI, D. R., SCHIRMBECK, L. W. Evaluation of OSEB and SEBAL models for energy balance of a crop area in a humid subtropical climate. **BRAGANTIA**, v. 77, p. 609-621, 2018.

SCHIRMBECK, J., FONTANA, D. C., RUHOFF, A. L., ROBERTI, D. R., SCHIRMBECK, L. W. Methodology of spatialization of energy balance components using MODIS and ERA Interim data. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 4, p. 1-11, 2020.

**SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO**. Zoneamento Agroecológico e Econômico: Regiões Agroecológicas – Estado do Rio Grande do Sul. V. 1, Porto Alegre, 1994.

SENTELHAS, P. C., BATTISTI, R., CÂMARA, G. M. S., FARIAS, J. R. B., HAMPF, A. C., NENDEL, C., The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science** 153, 1394-1411, 2015.

SILVA, N. D. F., MORAES, E., DE MOURA, M. S. B., OLIVEIRA, G. D., CARVALHO, H. D. S., OLIVEIRA, B. Análise do modelo METRIC na estimativa da evapotranspiração em área de cana-de-açúcar irrigada. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19., 2019, Santos. Anais. São José dos Campos: INPE, 2019.

SOUZA, L. S. B. D., MOURA, M. S. B. D., SEDIYAMA, G. C., SILVA, T. G. F. D. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 8, p. 627-636, 2015.

SOUZA, V. A., ROBERTI, D. R., RUHOFF, A. L., ZIMMER, T. ADAMATTI, D. S., GONÇALVES, L. G. G., DIAZ, M. B., ALVES, R. C. M., MORAES, O. L. L. Evaluation of MOD16 algorithm over irrigated rice paddy using flux tower measurements in Southern Brazil. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1911, 2019.

TIMMERMANS, W. J., KUSTAS, W. P., ANDERSON, M. C., FRENCH, A. N. An inter-comparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 4, p. 369-384, 2007.

WAGNER, A.P.L., FONTANA, D. C., FRAISE, C., WEBER, E., HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Imprensa), v. 48, p. 1192-1200, 2013.

WANG, K., LI, Z., CRIBB, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 102, n. 3 – 4, p. 293–305, 2006.

WANG, Z., SCHAAF, C. B., SUN, Q., SHUAI, Y., ROMÁN, M. O. Capturing rapid land surface dynamics with Collection V006 MODIS BRDF/NBAR/Albedo (MCD43) products. **Remote Sensing of Environment**, v. 207, p. 50-64, 2018.

YEH, S., CAI, W., MIN, S., MCPHADEN, M., DOMMENGET, D., DEWITTE, B., COLLINS, M., ASHOK, K., AN, S., YIM, B., KUG, J. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. **Reviews of Geophysics**, v. 56, n. 1, p. 185-206, 2018. 86

ZEBIAK, S. E., ORLOVE, B., MUÑOZ, Á. G., VAUGHAN, C., HANSEN, J., TROY, T., THOMSON, M. C., LUSTIG, A., GARVIN, S. Investigating El Niño Southern Oscillation and society relationships. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 17-34, 2015.

ZSOTER, E., HARRIGAN, S., BAUGH, C., PRUDHOMME, C. New products for the Global Flood Awareness System. **ECMWF Newsletter**, v. 162, p. 32-35, 2020.