

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOGRAFIA MESTRADO EM GEOGRAFIA

Marcos Augusto Gomes dos Santos

**ESPECTRORRADIOMETRIA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE E
RELAÇÃO COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE TORRE DE
FLUXO**

Santa Maria, RS
2020

Marcos Augusto Gomes dos Santos

**ESPECTRORRADIOMETRIA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE E RELAÇÃO
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE TORRE DE FLUXO**

A dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Territorial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, como requisito para dar prosseguimento na pesquisa de Dissertação para obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS
2020

dos Santos, Marcos

ESPECTRORRADIOMETRIA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE E RELAÇÃO
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE TORRE DE FLUXO /
Marcos dos Santos.- 2020.

59 p. ; 30 cm

Orientador: Waterloo Pereira Filho

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2020

1. Evapotranspiração 2. Sensoriamento Remoto 3. Espaço
Geográfico 4. Bioma Pampa I. Pereira Filho, Waterloo
II. Título.

Marcos Augusto Gomes dos Santos

**ESPECTRORRADIOMETRIA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE E RELAÇÃO
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE TORRE DE FLUXO**

A dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Territorial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, como requisito para dar prosseguimento na pesquisa de Dissertação para obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

Comissão Avaliadora

16 de janeiro de 2020

Waterloo Pereira Filho, Dr.

(Presidente/Orientador)

Valmir Viera, Dr. (UFSM)

Tatiana Mora Kuplich, Dra. (INPE)

Santa Maria, RS

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão de bolsas de estudo em nível de mestrado e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a pesquisa.

Ao Dr. Waterloo Pereira Filho pela paciência e dedicação para que este trabalho fosse concluído. A banca examinadora nas figuras da Dra. Tatiana Mora Kuplich e Dr. Valmir Viera. Agradeço também a equipe no Laboratório de Micrometeorologia (LUMET), em especial a Dra. Débora Regina Roberti, por processar e ceder os dados da área experimental e novamente a Dra. Tatiana Mora Kuplich pelo empréstimo do espectrorradiômetro utilizado nas missões de campo.

Agradeço a minha namorada Alessandra Moraes pelas palavras de incentivo nos momentos de dificuldade e dúvida. Ao Rafael Dezordi pelo imensurável auxílio em todas as missões de campo. Por fim, agradeço aos demais integrantes da equipe LABGEOTEC, Jean, Mariana, Eliane, Ademir, Janderlei, Cristiano e Gisieli.

*“Seja paciente e resistente,
um dia essa dor será útil para você”.*
- Ovid

RESUMO

ESPECTRORRADIOMETRIA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE E RELAÇÃO COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE TORRE DE FLUXO

Autor: Marcos Augusto Gomes dos Santos

Orientador: Waterloo Pereira filho

A evapotranspiração é um fenômeno natural importante do ciclo hidrológico, pois é a responsável pela produção de água para a atmosfera. O termo evapotranspiração carrega dois conceitos que explicam sua ação no ciclo hidrológico, a evaporação que pode ser descrita como a água que evapora de corpos d'água e de porções de solo exposto, e a transpiração que se refere a parcela de água proveniente da vegetação. A atividade metabólica da vegetação pode ser indicada por índices obtidos, conhecidos por Índices de Vegetação (IV), baseados no seu comportamento espectral. Este estudo avaliou relações entre a evapotranspiração (ET) obtida pela técnica de Covariância de Vórtices Turbulentos (CVT) com índices obtidos com recursos de sensoriamento remoto, tais como, Enhanced Vegetation Index 2 (EVI 2), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (TCARI) e Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI), em vegetação nativa do bioma pampa. Os dados experimentais foram obtidos em uma área de campo nativo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A ET foi estimada de uma torre de fluxo e missões de campo foram realizadas para obtenção de valores de reflectância da vegetação que posteriormente foram convertidos em valores de IVs. Após a identificação dos valores de ET e IVs gerou-se mapas das suas distribuições no espaço e no tempo e identificadas as relações entre ET com EVI2, NDVI, TCARI, ARVI. Os resultados revelaram existência de boa relação da ET com NDVI, TCARI, EVI2 e baixa relação com ARVI. Concluiu-se que as relações estabelecidas sugerem que estudos neste tema, quando realizado com "n" amostral adequado, podem identificar equações para estimar ET apenas utilizando índices de vegetação.

ABSTRACT

CAMPAIGN EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE FROM REMOTE SENSING

Author: Marcos Augusto Gomes dos Santos

Advisor: Waterloo Pereira Filho

Evapotranspiration is an important natural phenomenon in the hydrological cycle since it is responsible for the production of water into the atmosphere. The term evapotranspiration carries two concepts that explain its action in the hydrological cycle, evaporation can be described as the water that evaporates from water bodies and portions of exposed soil and the transpiration that refers to the portion of water coming from the vegetation. The metabolic activity of vegetation can be indicated by obtained indices, known as Vegetation Indices (IV), based on their spectral behavior. This study evaluated relations between evapotranspiration (ET) obtained by the Turbulent Vortices Covariance (CVT) technique with indices obtained from remote sensing resources, such as Enhanced Vegetation Index 2 (EVI 2), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (TCARI) and Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI), in native vegetation of the pampa biome. The experimental data were obtained in a native field area at the Federal University of Santa Maria (UFSM). The ET was estimated from a flow tower and field campaigns were performed to obtain vegetation reflectance values that were later converted into IV values. After identifying the ET and IV values, maps of their distributions in space and time were generated and the relationships between ET and EVI2, NDVI, TCARI, ARVI were known. The results revealed the existence of a good relationship between ET and NDVI, TCARI, EVI2 and a low relationship with ARVI. It was concluded that the relationships established suggests that studies on this theme, when carried out with an adequate "n" sample, can identify equations to estimate ET using only vegetation indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Características espectrais da vegetação verde sadia	25
Figura 2: Localização da área experimental.....	30
Figura 3: Espécies representativas dos tipos funcionais	31
Figura 4: Localização dos sítios experimentais da Rede SULFLUX. Os locais com linha em vermelho correspondem aos locais no qual as torres estão desativadas.	32
Figura 5: Fluxograma de trabalho	34
Figura 6: Distribuição dos pontos amostrais	35
Figura 7: Espectrorradiômetro, modelo FieldSpec® HandHeld	36
Figura 8: Placa de referência	36
Figura 9: Amostragem de reflectância em campo.	37
Figura 10: FRB (Fator de Reflectância Bidirecional) média dos pontos amostrais dos meses de setembro e outubro.	39
Figura 11: p10 (Ponto 10)	39
Figura 12: FRB (Fator de Reflectância Bidirecional) média dos pontos amostrais dos meses de novembro.....	40
Figura 13: p01.....	40
Figura 14: Distribuição espaçotemporal do índice de vegetação EVI2 e em destaque o p01.	42
Figura 15: Distribuição espaçotemporal do índice de vegetação NDVI	43
Figura 16: Distribuição espaço-temporal do índice de vegetação TCARI.....	44
Figura 17: Distribuição espaço-temporal do índice de vegetação ARVI	45
Figura 18: Gráficos de dispersão ET (mm/d) e IV	50

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Variáveis medidas, Altura de instalação e modelo dos sensores instalados.....	33
Tabela 2: Valores de correlação	47
Tabela 3: Interpretação do coeficiente de correlação.....	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.0 Penmam - Montheith.....	21
Equação 2.0 Covariância dos Vórtices Turbulentos (Eddy Covariance).....	22
Equação 3.0 EVI2 (Enhanced Vegetation Index 2)	27
Equação 4.0 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	27
Equação 5.0 TCARI (Transformed Absorption In Reflectance Index).....	28
Equação 6.0 ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)	29
Equação 7.0 Correlação de Spearman	38

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ARVI — *Atmospherically resistant vegetation index*
CRA — conteúdo relativo de água
EC — *Eddy covariance*
EVI2 — *Enhanced Vegetation Index 2*
FAO 56 — *Food and Agriculture Organization*
IAF — Índice de Área Foliar
IDW — *Inverse Distance Weighted*
IV — Índice de Vegetação
IVP — Infravermelho próximo
IVs — Índices de vegetação
LE — Fluxo de calor latente
LUMET — Laboratório de micrometeorologia
NDVI — Normalized Difference Vegetation Index
Nm — Nanômetro
PM — Penman – Montheith
REM — Radiação Eletromagnética
SR — Sensoriamento Remoto
SW maps — *SoftWel Maps*
TCARI — *Transformed absorption in reflectance index*
T_{máx.} — Temperatura máxima
T_{med} — Temperatura média
T_{mín.} — Mínima do ar
Ts — temperatura de superfície
UFMS — Universidade Federal de Santa Maria
R — Comprimento de onda do Vermelho

LISTA DE SÍMBOLOS

- ET — Evapotranspiração
- Etc — Evapotranspiração da cultura
- ET_o — Evapotranspiração de referência
- ETP — Evapotranspiração potencial
- ETR — Evapotranspiração real
- e_a — Pressão de vapor atual
- e_s — Pressão de vapor na saturação
- G — Fluxo de calor no solo
- P_a — Pressão atmosférica
- RG — Radiação global mensal, em mm. mês⁻¹
- R_g — Radiação solar global
- R_n — Saldo de radiação
- u — Velocidade do vento
- U₂ — Velocidade do vento a 2 m
- UR_{ar} — Umidade relativa do ar
- P_a — Pressão atmosférica
- U₂ — Velocidade do vento a 2 m de altura;
- E_s — Pressão de vapor na saturação (kPa) e
- P_a — Densidade do ar;
- C_p — Calor específico do ar à pressão constante;
- T' — Desvio em relação à média da temperatura do ar
- K — Desvio em relação à média da umidade específica do ar (kg kg⁻¹)
- y — Coeficiente psicrométrico
- ω' — Flutuações da velocidade vertical do vento;
- Δ — Declividade da curva de pressão de vapor na saturação (kPa °C⁻¹).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET)	19
2.1.1 Evapotranspiração potencial (ETP)	20
2.1.2 Evapotranspiração real (ETR)	20
2.1.3 Evapotranspiração de referência (ET _o)	20
2.1.4 Evapotranspiração da cultura (E _c)	20
2.2 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	21
2.2.1 Método de Penman - Montheith FAO 56 (<i>Food and Agricultura Organization</i>) (PM FAO 56)	21
2.2.2 Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos (<i>Eddy Covariance</i>)	22
2.2.3 Sensoriamento remoto para estimativa de evapotranspiração	23
2.3 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	24
2.3.1 EVI2 (<i>Enhanced Vegetation Index 2</i>)	27
2.3.2 NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	27
2.3.3 TCARI (<i>Transformed Absorption In Reflectance Index</i>)	28
2.3.4 ARVI (<i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>)	28
3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	29
3.1 INSTRUMENTAÇÃO METEOROLÓGICA DA TORRE DE FLUXO	33
4. METODOLOGIA	34
4.1 CAMPANHA EXPERIMENTAL	34
4.1.1 Estimativa de evapotranspiração	34
4.1.2 Cálculo de IVs com medidas radiométricas	35
4.2 CORRELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 REFLECTÂNCIAS	38
5.2 ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	41
5.2.1 Análise EVI2 (<i>Enhanced Vegetation Index 2</i>)	41
5.2.2 Análise NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	42
5.2.3 Análise TCARI (<i>Transformed Chlorophyll Absorption In Reflectance Index</i>)	43
5.2.4 Análise ARVI (<i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>)	44
5.3 COMPORTAMENTO TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	45
5.3.1 Comportamento temporal da Evapotranspiração	46
5.4 CORRELAÇÃO E DISPERSÃO	47
5.4.1 Correlação	47
5.4.2 Evapotranspiração X EVI2	48
5.4.3 Evapotranspiração X NDVI	48
5.4.4 Evapotranspiração X TCARI	49
5.4.5 Evapotranspiração x ARVI	49
5.5 DISPERSÃO DOS DADOS	49
6. CONCLUSÃO	50
7. REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é a atividade continuada da água nos oceanos, na atmosfera e nos continentes envolvendo superfície, solo e rocha. A hidrosfera é subdividida em oceanos, glaciares e água doce continental. O volume de cada um é diferente, sendo 97% água de superfície encontrada nos oceanos e os 3% restantes são constituídos por água doce e está distribuída da seguinte forma, três quartos congelada nos pólos e um quarto de forma subterrânea. As águas doces que alimentam o oceano contêm apenas 100 miligramas, enquanto a água dos mares contêm 35,5 gramas de sal diluído por litro (ALLÉGRE e REIS, 2019).

A análise da teoria de retroalimentação entre a umidade do solo e a água da chuva são elementos fundamentais para o estabelecimento do comportamento do ciclo hidrológico. O objetivo principal desse sistema está na conexão do balanço de energia e da umidade do solo. Um solo úmido possibilita o aumento do saldo de radiação (R_n) à superfície devido a diminuição do albedo da área. Por outro lado, a perda da temperatura da superfície é beneficiada com o aumento de água no solo, o que resulta em uma redução na radiação de onda longa emitida pela superfície (TASUMI et al., 2008).

Agregada a tal ação, o crescimento do conteúdo de vapor de água na atmosfera proporciona aumento na radiação de onda longa na direção da superfície, o que possibilita assim, elevação do balanço de radiação de onda longa. Ademais, o resfriamento da superfície dependeria da perda de calor +sensível (ELTAHIR, 1998).

No meio ambiente, o solo, as plantas e a atmosfera são consideradas, como elementos de um processo materialmente inter-relacionado e dinâmico, no qual sistemas de fluxo passam a estar relacionados como junções de uma corrente (REICHARDT, 1990). Perante a este referencial, inferências da mudança espaçotemporal dos fluxos radiativos e energéticos à superfície e da umidade do solo facilitam o conhecimento dos sistemas evaporativos (MOHAMED et al., 2004).

A Evapotranspiração (ET) tem uma importante presença na atividade climática global e nos sistemas de produção primária de biosistemas terrestres (RUHOFF, 2011). A evapotranspiração compreende tanto a evaporação da superfície do solo e da vegetação quanto a transpiração das plantas.

Diferentemente da pluviosidade, a evapotranspiração acontece todo tempo, resultante particularmente da exigência atmosférica e da oferta de água no solo. A necessidade atmosférica está diretamente associada ao aquecimento do ar (AGROSMART, 2019). Existe uma complexidade na mensuração da ET devido à sua relevante variação na escala de tempo e espaço, subordinando-se a cobertura vegetal, clima, topografia, características do solo, em meio a outras condições (ALLEN et al., 1998; MU et al., 2007). O estudo do déficit hídrico por ET e sua organização espacial e temporal podem apresentar consequência expressiva na elaboração de modelos matemáticos e computacionais referentes à gestão dos recursos hídricos.

Toda vez que a superfície estiver bem umedecida, a maior parte da energia disponível é utilizada na evapotranspiração, o que representa aproximadamente 70% a 80% do R_n , o restante da energia disponível será utilizado no aquecimento das plantas, do ar e do solo. A R_n é fonte de energia essencial durante o processo de ET, necessita da radiação solar incidente e do albedo da vegetação, sendo que vegetação mais escura absorve mais radiação solar (PEREIRA, 2002). Segundo Medeiros (2002), as principais variáveis climáticas que fornecem energia para evaporação e retirada de vapor de água a partir de superfícies evaporantes são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor. Dentre todos, a radiação solar é o elemento de maior valor na demanda evaporativa da atmosfera.

Em um estudo realizado por Ismael Filho et al. (2015) foi constatado pelo método de análise de trilha, que a radiação solar apresentou 0,941 de coeficiente de correlação, e temperatura média do ar apresentou e 0,737 de coeficiente de correlação, sendo estas variáveis importantes sobre a evapotranspiração. A variável da velocidade do vento não teve efeito significativo e a umidade relativa teve um efeito negativo de -0,865 de coeficiente de correlação. Este estudo revelou então que os elementos da natureza encontram-se em transformação constante, como resultado à evolução natural e às atividades antrópicas para entender o conjunto inter-relacionamento dos elementos que originam estas alterações, portanto é fundamental fazer análises com um grande conjunto de dados em diferentes escalas temporais e espaciais.

O estudo do espaço terrestre por meio de sensores de plataformas orbitais é a forma mais prática e acessível financeiramente de obter as informações fundamentais para observar e modelar estes fenômenos, particularmente em países de grande área como o Brasil. Por meio de programas computacionais dirigidos apenas para o processamento de imagens pode-se produzir imagens com diversas composições, aplicações de partes das imagens e classificações temáticas dos alvos e usos identificados nelas, obtendo-se produtos cartográficos que são empregados em pesquisas nas áreas de geologia, vegetação, uso do solo, relevo, agricultura, rede de drenagem, inundações, entre outros (SAUSEN, 2019).

Segundo Costa (2016), ultimamente muitos Índices de Vegetação (IVs) foram elaborados especialmente com a chegada de sensores hiperespectrais. Os IVs em geral permitem avaliar por meio de informações multiespectrais as características químicas e físicas da vegetação. Ainda em Costa (2016) diz que os espectrorradiômetros portáteis para obtenção de medidas em campo e laboratório favoreceram análises pontuais de indicadores biofísicos e bioquímicos da vegetação. O uso dessas técnicas pode contribuir para progressos em avaliações precisas e na validação do mapeamento, em termos da identificação e também da distinção entre espécies, razão fundamental como assistência ao controle ambiental e conhecimento das alterações nos ecossistemas resultantes das alterações climáticas.

Ferramentas de SR são aplicadas constantemente em pesquisas que consistem no estudo de eventos e fenômenos que acontecem no espaço terrestre, feita por meio de registro e da investigação das interações entre a radiação eletromagnética e as muitas substâncias que a constituem, para estimativa da ET e no monitoramento de fenômenos meteorológicos e ambientais (LEITE et al., 2012). Aplicar técnicas de sensoriamento remoto permite determinar espacialmente a distribuição evapotranspiração na extensão terrestre (MEDINA et al., 1998). De acordo com Warren (2011), na aplicação para modelagem hidrológica ou manejo agrícola, é desejável a utilização adequada de estimativas de ET com resolução espacial e temporal, assim sendo, possibilita estabelecer relações de ET por imagem de satélite a uma determinada área no terreno. Não somente resoluções espacial e temporal, necessitam ser observados em condições operacionais no processo de

produção e validação de uma série temporal de ET, em particular devem ser também observadas a dificuldade de processamento e a exigência de informações obtidas em campo, pois um volume grande de imagens também exigirá um volume grande de informações de entrada para obtenção de valores de ET.

A ET estimada por dados orbitais, é possível que seja obtida no horário exato do imageamento, sendo inviável seu uso para estimar balanço hídrico. Assim sendo, os cálculos instantâneos de evapotranspiração devem ser extrapolados, tornando-se fundamental relacionar a estimativa de imagem orbital com alguma medida obtida de forma contínua sobre o espaço terrestre, sendo essas medidas obtidas em estações meteorológica, ou utilizadas em experimentações agrometeorológicas (CHAVÉZ et al., 2008). Alternativas de monitoramento em grandes áreas de agricultura estão sendo exploradas apoiadas em técnicas de SR.

Índices de vegetação vem sendo utilizados desde a década de 1960, quando os cientistas iniciaram estudos para obter informações sobre parâmetros biofísicos da vegetação por meio de SR (HUETE e JUSTICE, 1999). Na década de 1970 os primeiros dados providos de sensores remotos orbitais começaram a ser utilizados para obter variáveis terrestres (ORHAN, 2014), desde então o NDVI passou a ser incluído em estudos ambientais. O NDVI é amplamente utilizado como uma variável de entrada em modelos para obtenção de valores de ET (FUZZO, 2015) (ARAUJO, 2016) (OTSUKI, 2015). Por ser uma variável que apresenta alto coeficiente de correlação com ET é também utilizado em regressão linear, a qual permite obter equação do modelo de regressão (SADO; WARREN; ROIG, 2018).

As técnicas empregadas auxiliam no monitoramento da variabilidade da ET e são frequentemente comparadas com medidas de ET obtidas por *Eddy Covariance* (EC) ou Covariância de vórtices turbulentos (CVT) (FANG et al., 2016). Utilizar índices de vegetação alternativos ao NDVI com o intuito de verificar a viabilidade do emprego de diferentes IV e na busca de melhores resultados, juntamente com o estudo envolvendo um método diferente para estimar ET motivaram a presente pesquisa. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é comparar índices de vegetação obtidos de técnicas de sensoriamento remoto com ET medida em campo nativo do bioma pampa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET)

A umidade contida na atmosfera é provida da evaporação da água do solo descoberto, das áreas aquáticas e também da transpiração das plantas. A evaporação é o processo pelo qual a umidade presente na superfície em forma líquida ou sólida, passa para o estado gasoso, ou seja, se transforma em vapor d'água. O termo evaporação é usado para descrever a perda de umidade das regiões aquáticas ou de solo descoberto, enquanto o termo evapotranspiração é usado para descrever a perda de água das áreas cobertas por vegetação, no qual a transpiração é de essencial relevância (AYOADE, 1996). Em outras palavras, evapotranspiração é o termo designado para explicar a produção de vapor d'água para a atmosfera, proveniente de superfícies vegetadas. Duas contribuições são envolvidas na evapotranspiração: a evaporação existente no substrato (solo ou água) e a transpiração resultante da atividade biológica dos seres vivos. (SILVA, 2019).

A capacidade da água e o potencial da água das folhas são indicadores quantitativos empregados na pesquisa de relações hídricas nas plantas, pela relevância da folha como base da fotossíntese, da transpiração e pela facilidade metodológica ao se trabalhar com esse órgão vegetal. Apesar de muitos considerarem ser o CRA (conteúdo relativo de água) melhor correlacionado com os processos fisiológicos das plantas, visto que está relacionado com a variação de volume celular, que é relevante no metabolismo das plantas sob deficiência hídrica (JONES, 1992).

As estimativas de ET podem ser realizadas utilizando lisímetros, cálculos de balanço hídrico ou aplicando equações a variáveis meteorológicas (ALLEN et al.; 1998). As estimativas espaçotemporais da ET apresentam uma complexidade para o entendimento da condição energética e hidrológica entre a superfície terrestre e a atmosfera nos diferentes biomas, principalmente em regiões tropicais, onde são constatados os maiores coeficientes de ET, onde um forte poder é exercido sobre os recursos de circulação atmosférica tanto em escala local, quanto em escala global. Por isso que estimativas precisas da ET se fazem necessárias na modelagem hídrica (RUHOFF et al., 2012).

Abaixo são definidos esses quatro conceitos para evapotranspiração: real, potencial, de referência e da cultura.

2.1.1 Evapotranspiração potencial (ETP)

A definição de ETP é determinada essencialmente como sendo a porção de água produzida no processo de evapotranspiração em um intervalo de tempo, a partir de um solo totalmente coberto uniformemente por vegetação rasteira e sem restrições hídricas (TANNER; PELTON, 1960).

2.1.2 Evapotranspiração real (ETR)

A ETR é estabelecida a partir de uma vegetação específica de referência com altura e albedo definidos, sendo 0,12 metros e 0,23 metros, respectivamente. Também necessita de altura uniforme em solo totalmente coberto e sem restrições de água (SMITH, 1991).

2.1.3 Evapotranspiração de referência (ETo)

O que define a ETo é a porção de água transferida por evaporação e transpiração para a atmosfera, nas condições reais da umidade do solo e da atmosfera (MATZENAUER, 1992).

2.1.4 Evapotranspiração da cultura (ETc)

Os planejamentos de irrigação que utilizam a ETc têm vantagem sobre culturas sem essa estimativa, pois a estimativa de ETc representa o quanto de reposição de água é ideal para o bom desenvolvimento da cultura. A ETc depende diretamente das condições meteorológicas e da superfície evapotranspirante, que é expressa pelo coeficiente de cultura (kc), sendo kc apenas a relação entre ETc e ETo (CARVALHO et al., 2009).

2.2 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Para a avaliação da evapotranspiração existem diversos métodos que se dividem em três categorias: métodos apoiados em física teórica, métodos semi-empíricos e métodos empíricos. E inseridos nestes métodos existem quatro classificações que são: métodos embasados unicamente em dados de temperatura média do ar, em combinações de temperatura do ar e radiação incidente, na combinação de temperatura do ar e pressão de vapor e apoiados em dados de evaporação (FERNANDES et al., 2010).

2.2.1 Método de Penman - Montheith FAO 56 (*Food and Agricultura Organization*) (PM FAO 56)

Devido a necessidade de muitas variáveis climatológicas, este método pode estimar ET diariamente, mas limita-se em relação a disponibilidade dos dados, que exigem equipamentos e sensores específicos instalados em torres meteorológicas e micrometeorológicas, normalmente encontrados em campos experimentais, onde existe necessidade de padrão tecnológico elevado para a obtenção de dados confiáveis (ANDRADE JÚNIOR et al., 2003).

Para o cálculo de estimativas diárias este modelo necessita de obtenção diária de umidade relativa do ar (URar), pressão atmosférica (Pa), velocidade do vento (u) temperatura máxima (tmáx.) e mínima do ar (tmín.) e radiação solar global (Rg) (Equação 1.0)(Allen et al., 1998). Entretanto apesar de ser um método confiável, os produtores com menor poder aquisitivo, não dispõem desses dados, pois não pensam ser necessário o investimento, e optam pela utilização de métodos mais simples para o cálculo da ETo (CARVALHO et al., 2011).

$$ETo = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{med} + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad \text{Equação (1.0)}$$

Sendo:

ETo (PM FAO 56) = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});

Δ = declividade da curva de pressão de vapor na saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

Rn = radiação líquida ou saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura;

T_{med} = temperatura média entre a máxima e a mínima;

e_s = pressão de vapor na saturação (kPa) e

e_a = pressão de vapor atual (kPa).

γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$);

2.2.2 Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos (*Eddy Covariance*)

A definição de fluxo é dada como a transferência de quantidade por unidade de área pelo tempo, onde se estabelece a relação com calor, massa, mistura, momentum e fluxos (STULL, 1988). O método da covariância dos vórtices foi proposto por Swinbank em 1951, o qual permite determinar os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e latente (λLE) a partir da equação abaixo (Equação 2) (ARYA; HOLTON, 2001):

$$H = \rho_a C_p \omega' T'$$

$$LE = \rho_a \omega' q' \quad \text{Equação (2.0)}$$

em que: ρ_a densidade do ar; C_p é o calor específico do ar à pressão constante; ω' flutuações da velocidade vertical do vento; T' expressa o desvio em relação à média da temperatura do ar (K); q' é o desvio em relação à média da umidade específica do ar (kg kg^{-1}). Após obtido o LE , definido em unidade de W m^{-2} , pode-se estimar e ET através da equação:

$$ET = 1000 \frac{LE}{\lambda \rho_{H2O}} \Delta t$$

Dividindo-se pelo λ , que é o calor latente de vaporização da água, ρ_{H2O} é a densidade da água, Δt é o intervalo de tempo da média de LE. A unidade de ET será em mm no intervalo de tempo definido.

Esta é uma técnica de difícil acesso devido a alto valor da instrumentação (anemômetros sônicos e analisadores de gás) para monitorar as componentes dos ventos e escalares com alta frequência de amostragem para obter valores de fluxo suficientemente representativos providos de áreas experimentais de forma continuada e com resolução temporal adequada e suficiente. Segundo Chen, Chu e Li (2012), embora apresentando quantidade significativa de pesquisas pelo método de *Eddy Covariance*, existe uma resistência quanto a sua aplicação a longo prazo devido a quantidade de dificuldades como falhas na aquisição dos dados, condições micrometeorológicas não ideais, limitações dos instrumentos de medidas ou falta de área suficientemente grande para garantir que as medidas dos fluxos são daquele ecossistema.

2.2.3 Sensoriamento remoto para estimativa de evapotranspiração

O sensoriamento remoto é a técnica de obter informação de fenômenos e objetos sem precisar ter contato físico direto com eles (JENSEN, 2009). Segundo Novo (2010), conhecer o comportamento espectral dos alvos ou sua assinatura espectral torna-se importante no estudo do SR.

O SR é de grande utilidade, tanto na estimativa de parâmetros relacionados à temperatura e radiação, como na construção de modelos físicos ou empíricos, em que os fatores relacionados à evapotranspiração sejam passíveis de mapeamento remoto, como os seguintes componentes do balanço de energia: fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo e radiação líquida (Engman, 1993). Segundo Costa (1997), condições hidrológicas e sua influências sobre a vegetação de bacias hidrográficas podem ser estimadas utilizando técnicas de SR. Devido ao caráter multiespectral, imagens orbitais surgem como alternativa para analisar alguns componentes agrometeorológicos como: temperatura foliar e situação hídrica regional.

Os dados obtidos via SR apresentam a vantagem de permitir coleta de informações detalhadas para uma extensa área em curto espaço de tempo, além da quantificação de parâmetros físicos da superfície terrestre com um fluxo quase contínuo de dados com alta resolução temporal e espacial (Paiva et. al., 2011). A determinação da distribuição espaçotemporal da ET pode dar-se pela aplicação de técnicas de SR (Medina et al., 1998). A modelagem de IVs a partir da temperatura da superfície (TS) e NDVI extraídos por técnicas de SR, são utilizados para indicar estresse hídrico, estimar umidade do solo e estimar ET (CARLSON, 2007).

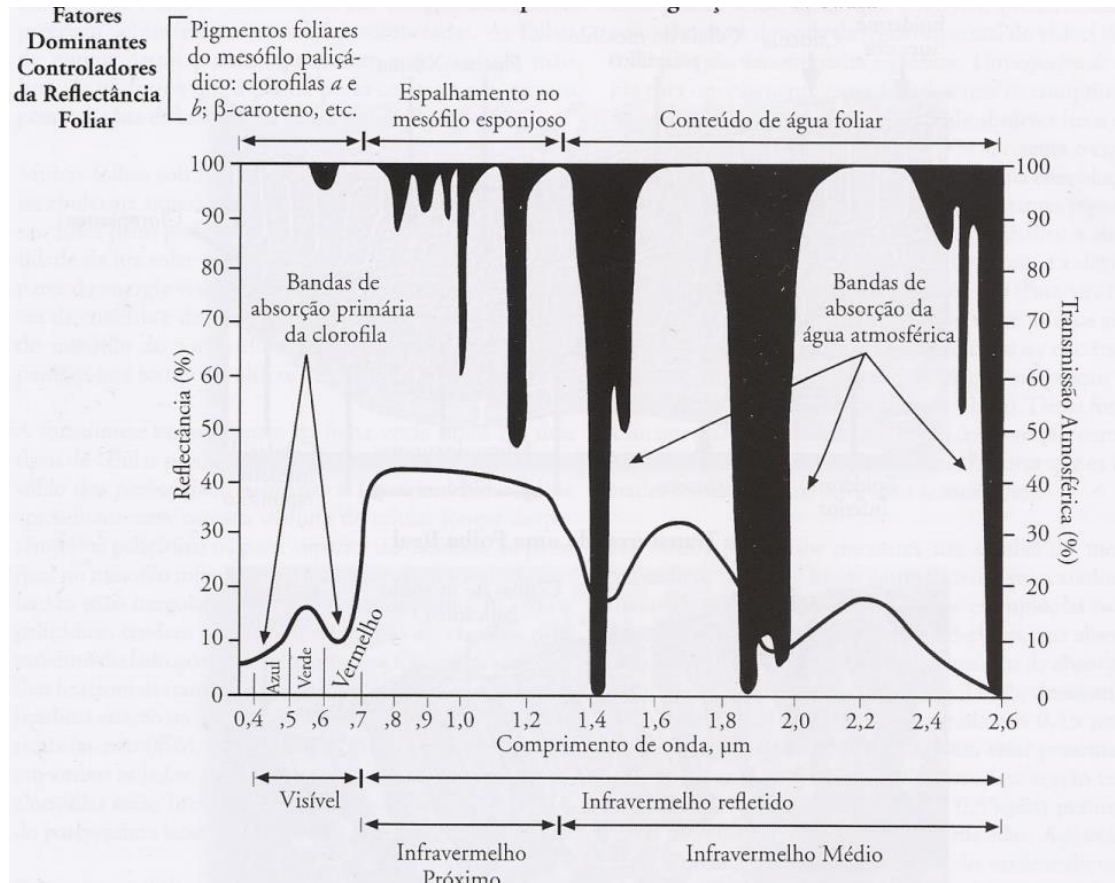
2.3 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O que a cobertura vegetal nos revela em determinado produto de SR é resultado de um processo composto que envolve muitas características e condições ambientais. O que é realmente medido remotamente por um sensor, resultante de vegetação específica, não pode ser explicado somente pelos aspectos inerentes dessa vegetação, inclui também a interferência de outros critérios e fatores como a fonte de radiação, o espalhamento atmosférico, a interferência da reflectância do solo, os teores de umidade, sombra e as características tanto da folha quanto do dossel (PONZONI, 2001).

Os índices de vegetação são cálculos que em sua maioria utilizam faixas espectrais, localizadas nos comprimentos de onda do vermelho (R) e infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético (EPIPHANIO et al., 1996). Índices de vegetação têm sido amplamente utilizados para observar a cobertura vegetal da Terra em escalas global e local (MIURA et al., 2001).

O método por trás dos IV é fundamentado não somente no fato de que a reflexão espectral no R e no IVP são diretamente relacionadas à atividade fotossintética da vegetação, mas também na teoria de que o uso de duas ou mais bandas espectrais pode minimizar as principais fatores que causadores de “ruídos” que afetam a resposta espectral da vegetação (RÊGO et. al., 2012, p. 1221).

Figura 1: Características espectrais da vegetação verde sadia



Reflectância espectral da folha vegetal verde sadia, para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 e 2,6 µm. Os fatores dominantes que controlam a reflectância foliar existentes no mesófilo paliçádico (por exemplo, as clorofilas a e b, e o B- caroteno), o espalhamento da energia infravermelha no mesófilo esponjoso e a quantidade de umidade na planta (JENSEN, 2009).

Como descreve RSI (2003), vegetação apresenta no seu comportamento espectral duas bandas de absorção de REM (Radiação Eletromagnética), a primeira banda se situa próximo ao comprimento de onda de 0,48 µm (quatrocentos e oitenta nanômetros) pela existência de pigmentos carotenoides, e a segunda banda fica próximo ao comprimento de onda de 0,68 µm que corresponde ao processo de fotossíntese da vegetação. Ainda analisando o espectro visível é percebido que existe alta reflectância da vegetação próximos ao comprimento de onda da 0,5 µm, região correspondente ao comprimento de onda do verde, apresentando assim a cor verde aos olhos humanos na folha.

Nos comprimentos de ondas que compreende a faixa de 0,7 μm até 1,3 μm , em que estão associados a estrutura interna da folha, existe também uma alta reflectância. A amplitude entre absorção e reflectância nos diferentes comprimentos de onda acontece para manter o equilíbrio energético interno da planta, pois evita o superaquecimento e conseqüentemente a degradação da clorofila.

No comprimento de onda na faixa do Infravermelho médio, em torno de 1,4 μm e 1,9 μm , na folha mais dois picos de absorção são apresentados correspondente ao conteúdo de água na folha. Vale salientar que este tipo de explicação sobre este determinado comportamento espectral é considerado para apenas uma folha em específico, e que podem não ser precisa quando tratar de cobertura vegetal. A diferença entre uma folha isolada e cobertura vegetal pode acontecer por fatores como solo, orientação das folhas, e geometria de imageamento, índice de área foliar, ângulo de iluminação, biomassa, estado fenológico, condições atmosféricas e as características de cada folha (formato, posição, conteúdo de água, pigmentação, estrutura interna) (RSI, 2003).

A modelagem de parâmetros biofísicos da vegetação utilizando SR vem sendo explorado desde os anos de 1960. Segundo Running et al 1994 e Huete 1999, os índices de vegetação têm finalidade de indicar atividade da vegetação verde e idealmente um índice de vegetação deve:

- Maximizar a sensibilidade a parâmetros físicos da vegetação de uma forma linear para que tal sensibilidade seja fiel para as várias condições das plantas facilitando a calibração do índice.
- Fazer a normalização dos efeitos externos como interferência atmosférica e ângulo de visada, possibilitando comparações espaço-temporais.
- Normalizar variações no substrato sob o dossel como declividade e aspecto, solo, a presença de galhos secos ou vegetação senescente que podem ser descritos como componentes não-fotossintéticos.
- Ser agregável a algum parâmetro biofísico mensurável como biomassa, índice de área foliar e radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

2.3.1 EVI2 (*Enhanced Vegetation Index 2*)

O EVI 2, proposto por Jiang et al. (2008), anulou a utilização da banda espectral na faixa do azul (Equação 3) minimiza distorções causadas pela atmosfera, já que essa banda é a mais sensível a essas variações, teoricamente melhorando os resultados fornecidos pelo EVI.

$$EVI2 = 2,5 * \frac{B_{nir} - B_{red}}{(B_{nir} + 2,4 * B_{red} + 1)} \quad \text{Equação (3.0)}$$

Onde: BNIR refere-se à banda do infravermelho próximo e Bred a banda do vermelho. Este índice apresenta comportamento similar ao tradicional índice EVI, que tem melhor sensibilidade em área com alta biomassa, o EVI2 além de não utilizar a banda do azul que apresenta distorções decorrentes do espalhamento atmosférico (JIANG, 2008).

2.3.2 NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

O NDVI foi proposto por ROUSE et al. (1973), que normalizaram por razão simples dois comprimentos de onda, os quais normalizaram para o intervalo de -1 a +1. O cálculo de normalização (Equação 4) é realizado para ser utilizado com intuito de monitorar a vegetação, construindo perfis sazonais de forma espaçotemporal, permitindo avaliações que comparem tais perfis em diferentes períodos. Por meio deste IV é possível mapear atividades sazonais de fenologia, duração do período de crescimento, saúde vegetativa e fisiológicas das folhas, até o período de senescência. Por ser uma normalização apresenta valores que variam desde os negativos, indicam a resposta de alvos que não respondem como uma vegetação em condições saudáveis, podendo ser interpretado como não sendo vegetação e valores positivos que quanto mais próximos de 1, indicam vegetação mais saudável (ATAÍDE, 2012).

$$NDVI = \frac{Nir - Red}{Nir + Red} \quad \text{Equação (4.0)}$$

Nir = comprimento de onda do infravermelho próximo

Red = comprimento de onda do vermelho

2.3.3 TCARI (*Transformed Absorption In Reflectance Index*)

Este índice utiliza no seu cálculo as bandas de 550 e 700 *nm* que correspondem a mínima absorção pelos pigmentos fotossintéticos e a banda de 670 *nm* onde existe a absorção máxima pela clorofila "a" (Equação 5). A banda de 700 *nm* está localizada na borda da região onde se encontra o começo da absorção "red edge" onde o mesófilo esponjoso exerce maior influência na resposta espectral (kim et al., 1994). Uma das desvantagens deste índice é a sensibilidade às propriedades de refletâncias do solo abaixo do dossel, principalmente quando a vegetação apresenta baixo IAF (Índice de área foliar).

$$TCARI = 3 * [(P_{700} - P_{670}) - 0,2 * (P_{700} - P_{550}) \left(\frac{P_{700}}{P_{670}} \right)]$$

Equação (5.0)

Onde:

P_{550} = comprimento de onda presente na faixa espectral do verde

P_{670} = comprimento de onda presente na faixa espectral do vermelho

P_{700} = faixa espectral do "red edge"

2.3.4 ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*)

O ARVI foi desenvolvido por Kaufman e Tanré (1992), o objetivo proposto pelo ARVI é de atenuar os efeitos atmosféricos causados pela variação no canal do vermelho, ocorridas devido às mudanças de opacidade na atmosfera que normalmente ocorrem devido à presença de aerossóis fumaças e poeiras.

O termo "Atmospherically Resistant" se refere às menores variações que ocorrem nos valores do ARVI, quando comparadas às variações que ocorrem nos valores do NDVI, para a mesma cena que ocorrem devido às grandes dimensões das áreas que são capturadas pelos sensores. O índice ARVI apresenta em sua formulação, a diferença entre os valores de reflectância do

canal do Azul e os do Vermelho, conforme mostrado pela equação (Equação 6) (KAUFMAN e TANRÉ, 1992):

$$ARVI = \frac{P_{nir}^* - P_{rb}^*}{P_{nir}^* + P_{rb}^*} \quad \text{Equação (6.0)}$$

Onde:

$$P_{rb}^* = P_{red}^* - \gamma(P_{bLue} - P_{red}^*)$$

onde:

P_{nir}^* = comprimento de onda do infravermelho próximo

P_{blue}^* = comprimento de onda do azul

P_{red}^* = comprimento de onda do vermelho

P_{rb}^* = correção do espalhamento na região do azul e do vermelho

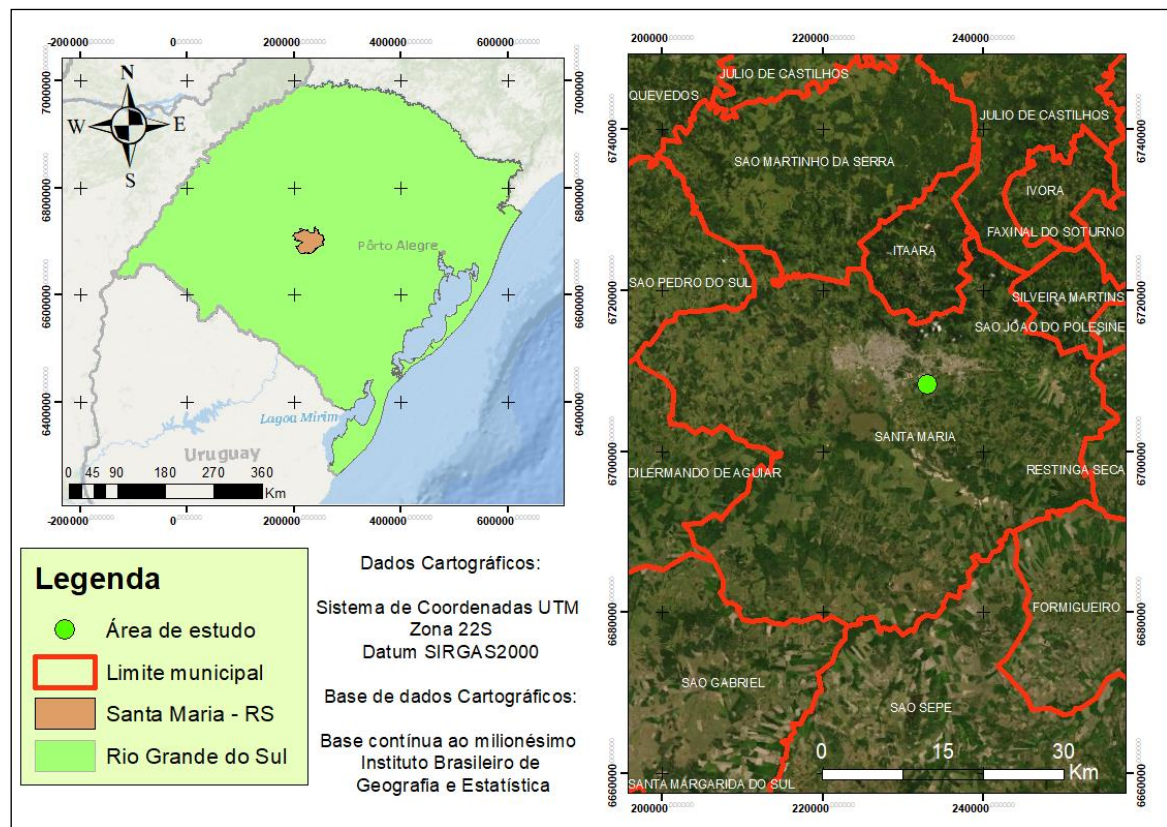
γ é o parâmetro que controla a correção atmosférica e depende do tipo de aerossol, sendo utilizado $\gamma = 1$ quando o modelo do aerossol não é avaliado.

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi realizado no município de Santa Maria - Rio Grande do Sul, em uma das várias áreas experimentais da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 2).

O solo da área é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico, segundo o mapa exploratório de solos do estado do RS (IBGE, 2002). A composição do solo na área experimental é: 36,94% de silte, 33,95% de areia e 29,09% de argila, classificação de textura Franco-argilosa. O clima pertence à zona do franco Cfa, temperado úmido com verão quente, de acordo com a classificação de Köppen (NIMER, 1989). A área foi especialmente escolhida por ser monitorada frequentemente e objeto de outros estudos, existindo outras informações que podem ser utilizadas futuramente.

Figura 2: Localização da área experimental



Fonte das imagens: Basemap Arcgis

O Rio Grande do Sul abrange uma biodiversidade de campos nativos que raramente é encontrada fora do estado ou em qualquer outro ecossistema de pastagem. O bioma pampa compõe aproximadamente 63% da área do RS e foram registradas mais de 500 espécies de gramíneas que possuem alto valor nutritivo (MOTT & MOORE, 1970). Por ser um ambiente heterogêneo, e ainda carente de conhecimento sobre as espécies que compõem o bioma, pode estar se tornando um obstáculo na preservação deste ecossistema. Devido a esta heterogeneidade que áreas de estudo, assim como a área de estudo objeto deste trabalho, podem ser manejadas de diferentes formas. A pluralidade de campos característica do bioma pampa sugere que haja um agrupamento por tipos funcionais de vegetação de acordo com atributos foliares. Na área de estudo predomina pastagem natural com distinção agrupada em quatro tipos funcionais que são: Tipo A - *Axonopus affinis* (grama-tapete), Tipo B - *Paspalum notatum* (grama-forquilha forquilha, grama-do-rio-grande, grama-batatais, pensacola), Tipo C - *Andropogon lateralis* (capim-caninha) e Tipo D - *Aristida*

jubata (barba-de-bode) (Figura 3), utilizada como pasto para o gado de corte (QUADROS et al., 2015).

Figura 3: Espécies representativas dos tipos funcionais

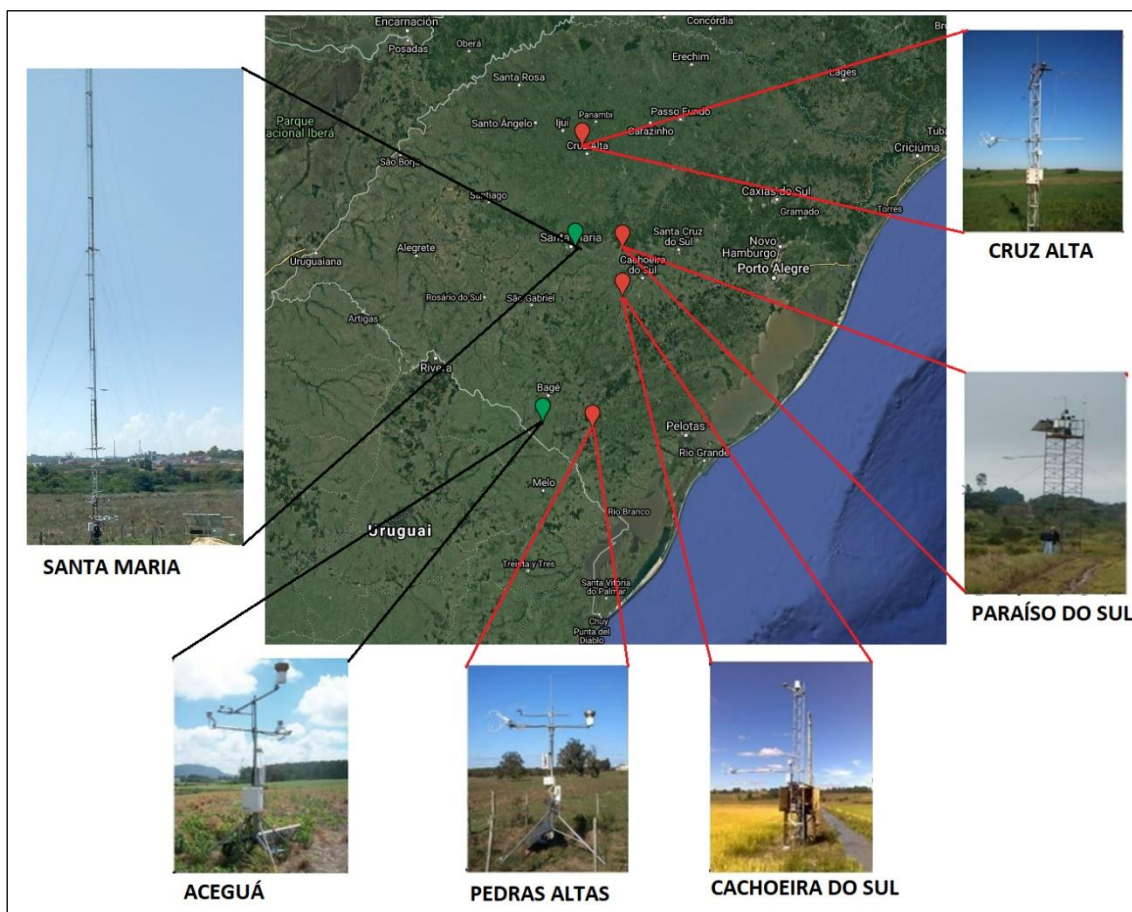


Fonte: Fernando Quadros Tipos A, C. Sérgio Bordignon Tipo B. Ilsi Boldrini Tipo D.

Uma torre de fluxo está instalada no sítio experimental coletando dados atmosféricos e fluxos superficiais que permitem a estimativa da Evapotranspiração pelo método Covariância dos vórtices. Esta torre pertence ao projeto rede Sulflux. A rede SULFLUX (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) corresponde a um conjunto de torres instrumentadas com sensores padrões, que efetua medidas com alta frequência de obtenção em

diferentes ecossistemas situados no Rio Grande do Sul. As medidas disponibilizam dados suficientes para construção e validação de Modelos Numéricos (MN), de clima e superfície. A SULFLUX (www.ufsm.br/sulflux) possui dados de várias torres de fluxo instaladas sob diversas áreas do estado, e de outras duas localidades no qual foram monitoradas anteriormente (Figura 4).

Figura 4: Localização dos sítios experimentais da Rede SULFLUX. Os locais com linha em vermelho correspondem aos locais no qual as torres estão desativadas.



Fonte: SULFLUX

A torre alocada no sítio experimental de Santa Maria – RS, encontra-se a uma altitude de 88 m, sua unidade de relevo pode ser atribuída a depressão central, vegetação de campo natural com dossel a aproximadamente 0,5 m, aspecto oeste, declividade de 0,6°. O material da torre é do tipo metálico com 30 m de altura e alimentado por painéis solares (SULFLUX, 2020).

3.1 INSTRUMENTAÇÃO METEOROLÓGICA DA TORRE DE FLUXO

Os dados experimentais atmosféricos foram obtidos por torre de fluxo (micrometeorológica). A instrumentação das estações micrometeorológicas para o sítio de Santa Maria é mostrado na abaixo (Tabela 1). Com os instrumentos instalados na torre será possível estimar ET_r no local.

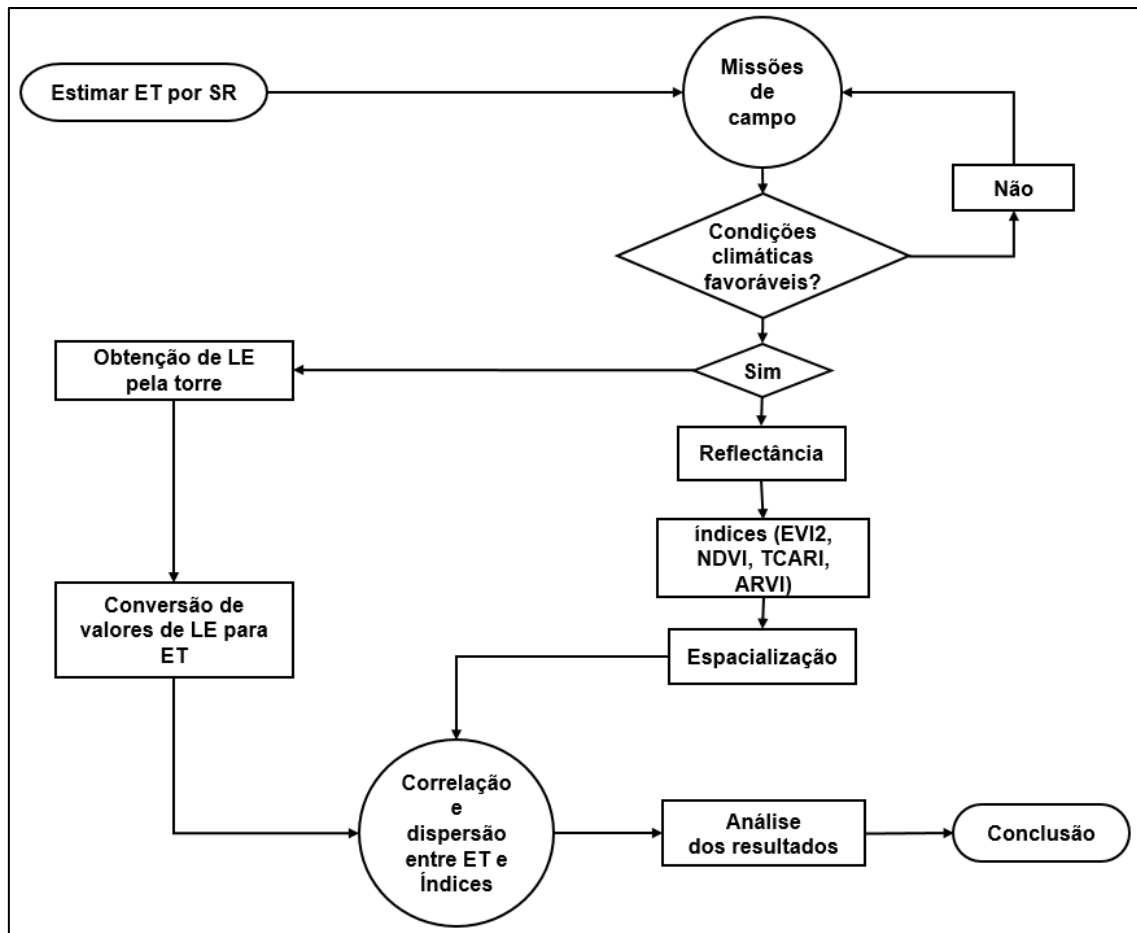
Tabela 1: Variáveis medidas, Altura de instalação e modelo dos sensores instalados

VARIÁVEL	ALTURA DO SENSOR	MODELO DO SENSOR
Componentes da intensidade do vento	3 m	Wind Master Pio/Gill Instruments IRGASON (LI-COR)
Concentração de vapor d'água e CO ₂	3 m	IRGASON (LI-COR)
Radiação solar	3 m	CNR4/Kipp&Zoen
Saldo de Radiação	3 m	CNR4/Kipp&Zoen
Radiação Fotossinteticamente Ativa	3 m	Li-190SL/Kipp&Zoen
Fluxo de energia na forma de calor do solo	-0,05 m -0,1 m	HFP01 (Hukseflux) HFP01 (Hukseflux)
Temperatura do solo	-0,5 m	T108/Campebell Scientific
Conteúdo de água no solo	-0,1 m	CS 616/Campebell Scientific
Temperatura do ar	3 m	HMP155/Vvaisala
Umidade relativa do ar	3 m	HMP155/Vvaisala
Precipitação	6 m	TR52USW/Texas Electronics, inc.

Fonte: (Adaptado de Rubert, G. 2018)

4. METODOLOGIA

Figura 5: Fluxograma de trabalho



4.1 CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1.1 Estimativa de evapotranspiração

Para obter os valores experimentais de evapotranspiração foi utilizado o fluxo de calor latente (LE) experimental, estimado utilizando a técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos. Esta técnica é utilizada para estimar o LE por meio da covariância entre valores medidos de velocidade vertical do vento e concentração de água na atmosfera. A ET foi estimada pela equipe do Laboratório de Micrometeorologia da UFSM, seguindo o processamento de dados descrito em (Rubert et al. 2018).

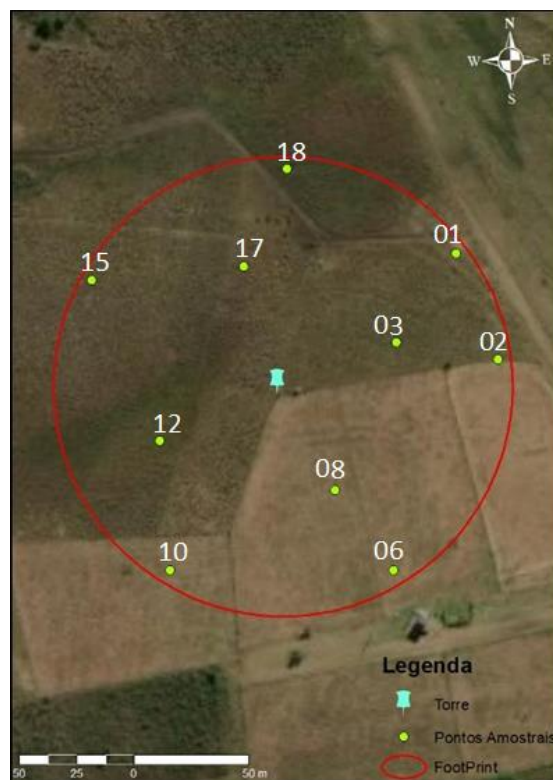
Neste trabalho foram utilizadas as datas de 30/09/2019, 08/10/2019, 11/10/2019, 20/11/2019 e 28/11/2019, no período entre 11h e 15h. Este horário

foi definido para estar de acordo com o horário apropriado para coletas dos dados espectrais. Já os dias acima citados, foram escolhidos em função das datas de funcionamento da torre de fluxo.

4.1.2 Cálculo de IVs com medidas radiométricas

Foi delimitado um raio de 100 m equivalente a 3 ha a partir da torre de fluxo alocada na área experimental para coletar medidas de reflectância em 10 pontos previamente selecionados (Figura 6). Os pontos amostrais foram localizados com o auxílio do aplicativo de celular *SW maps* (*SoftWel Maps*).

Figura 6: Distribuição dos pontos amostrais



Fonte da imagem: Basemap Arcgis

Após localizado cada ponto amostral foi realizada a coleta com espectrorradiômetro, modelo *FieldSpec® HandHeld 2TM* ASD inc. (Figura 7), que atua no intervalo de comprimentos de onda entre 325 nm e 1075 nm, com a resolução espectral de 1 nm. Em cada ponto foram realizadas 10 repetições de medidas, que foram coletados período de 11h e 13h, horário de Brasília, em condições climáticas ideais e adequadas. Após a mensuração da reflectância,

para a análise da proposta foram calculados os índices de vegetação EVI, NDVI, TCARI e ARVI.

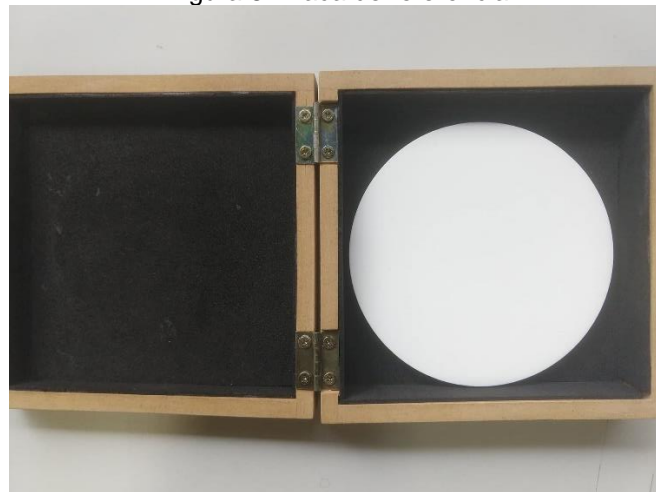
Figura 7: Espectrorradiômetro, modelo FieldSpec® HandHeld



Fonte: Malvern Panalytical

A mesma técnica de coleta foi empregada igualmente em todos os pontos e em todas as missões de campo. A técnica consiste em uma calibragem do equipamento em placa de referência lambertiana (Figura 8), certificada para ser utilizada juntamente com este equipamento.

Figura 8: Placa de referência



Fonte: Autor

A calibragem foi sempre realizada antes de cada medida pontual, com equipamento voltado para o melhor ângulo solar, com a finalidade de evitar sombreamento na placa por parte do equipamento ou do operador e a obtenção da medida foi constantemente obtida a aproximadamente 1,50 m de altura do alvo, também voltado para o ângulo de maior incidência solar como mostra a imagem abaixo (Figura 9).

Figura 9: Amostragem de reflectância em campo.



Fonte: Autor

4.2 CORRELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Após obtidos todos os dados, estimados os valores de ET pelo método CV e calculados o EVI2, NDVI TCARI e ARVI, o procedimento seguinte foi a verificação do nível de correlação existente entre os valores de ET e IVs. Para o cálculo de correlação foi utilizado o coeficiente de correlação de Spearman dado pela equação abaixo (Equação 7).

$$p = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad \text{Equação (7.0)}$$

Onde:

n = é o número de pares (X_i, Y_i)

d_i = (posto de X_i dentre os valores de X) – (posto de Y_i nos valores de Y)

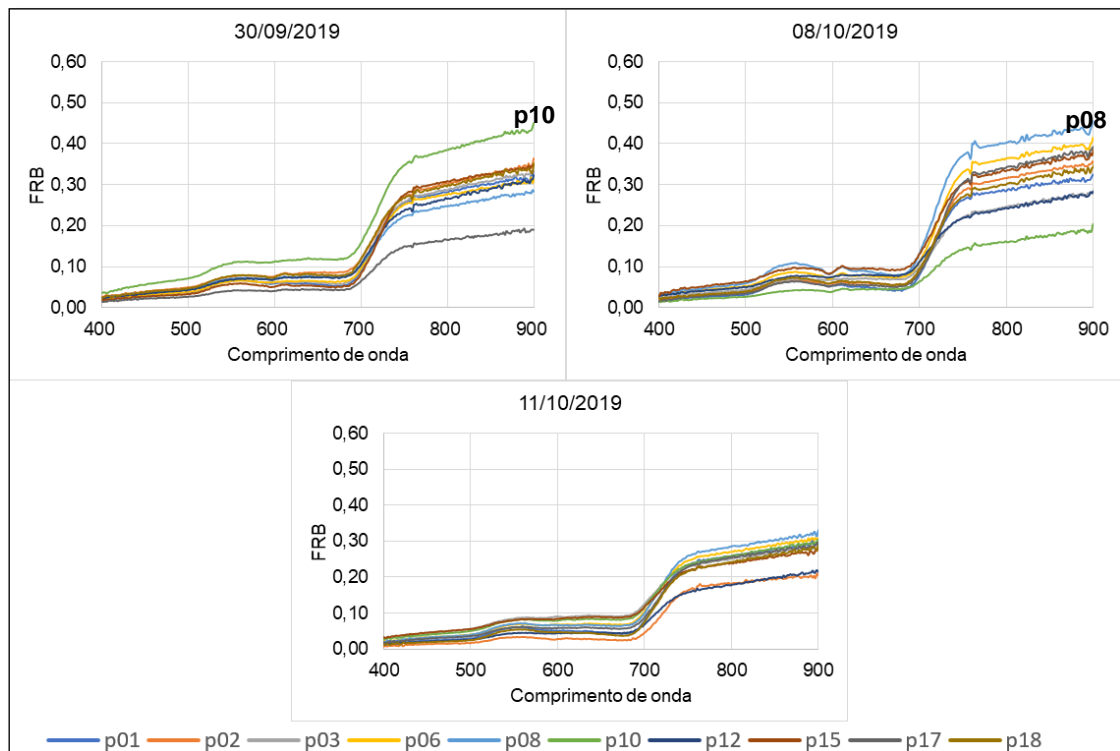
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 REFLECTÂNCIAS

A reflectância é caracterizada pela razão entre a radiação refletida pela radiação incidente em alvos terrestres. A reflectância espectral pode ser medida a grandes distâncias usando sistemas multiespectrais de sensoriamento remoto. As superfícies podem apresentar diversificados tipos de refletância como a reflectância especular, especular quase perfeita, difusa e lambertiana (JENSEN, 2009)

As variações das reflectâncias expressas nos gráficos da imagem (Figura 10) dos meses de setembro e outubro, apresenta valores mínimos em torno de 0,2 e valores máximos em torno de 0,45. Ocorreu variação entre os valores de reflectância dos pontos nos dias 30 de setembro e 08 de outubro. No dia 11 de outubro foi constatado uma redução no valor máximo das curvas de reflectância, que teve o valor reduzido para valores próximos a 0,35.

Figura 10: FRB (Fator de Reflectância Bidirecional) média dos pontos amostrais dos meses de setembro e outubro.



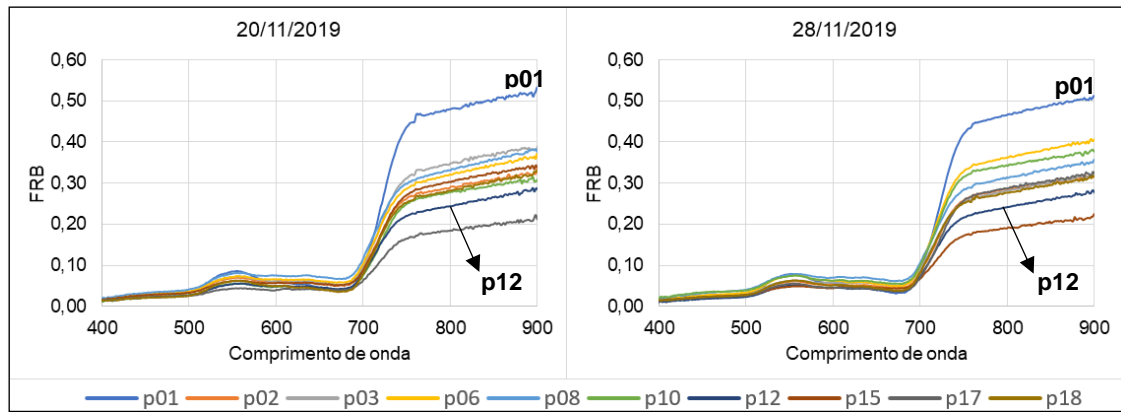
O p10 (Figura 11) foi o ponto amostral que sofreu uma visível mudança entre os dias 30 setembro e 08 de outubro. Em duas semanas antes da obtenção da primeira medida não houve registro de precipitação, já entre as duas primeiras datas foram registrados eventos de precipitação e este fenômeno pode ter influenciado na resposta espectral dos alvos.

Figura 11: p10 (Ponto 10)



Se referindo a questão da cobertura vegetal da área de estudo, a mesma abordagem deve ser aplicada aos gráficos da imagem abaixo (Figura 12).

Figura 12: FRB (Fator de Reflectância Bidirecional) média dos pontos amostrais dos meses de novembro



Os pontos amostrais p01 e p12 não apresentaram oscilação nas duas datas apresentadas pelos gráficos. Os gráficos de novembro apresentaram a reflectância máxima de 0,5 enquanto os gráficos de setembro e outubro, apresentaram valores máximos em torno de 0,45. O ponto p01 foi o que menos sofreu alteração nos meses de novembro, isso deve-se a busca pela localização exata de cada ponto amostral e este ponto em específico apresenta uma vegetação muito característica entre as demais, facilitando a obtenção da medida sempre no mesmo tipo de vegetação, enquanto nos demais pontos a heterogeneidade da vegetação dificultou que as amostras fossem obtidas exatamente no mesmo local.

Figura 13: p01



A variação da resposta espectral da vegetação no tempo e no espaço se caracteriza por conter uma vegetação heterogênea. Segundo Boldrini (1997), a diversidade florística do bioma pampa pode conter aproximadamente 450 espécies de gramíneas forrageiras, 150 espécies de leguminosas e demais famílias de fanerógamas, atingindo até 3000 espécies distintas de cobertura vegetal.

A análise dos gráficos caracteriza a distinção entre a vegetação dos pontos amostrais. Essa variação refere-se à quantidade de espécies e deslocamento na obtenção das medidas de reflectância, que não sempre foram realizadas exatamente no mesmo local e conseqüentemente as espécies que compunham a cobertura do local de amostragem também não foram as mesmas no momento da obtenção das medidas espectrais. Contudo, considera-se também o ângulo de abertura de visada do equipamento utilizado, sendo que, o ângulo de 25° tende a abranger maior parcela do terreno quando operado de alturas maiores.

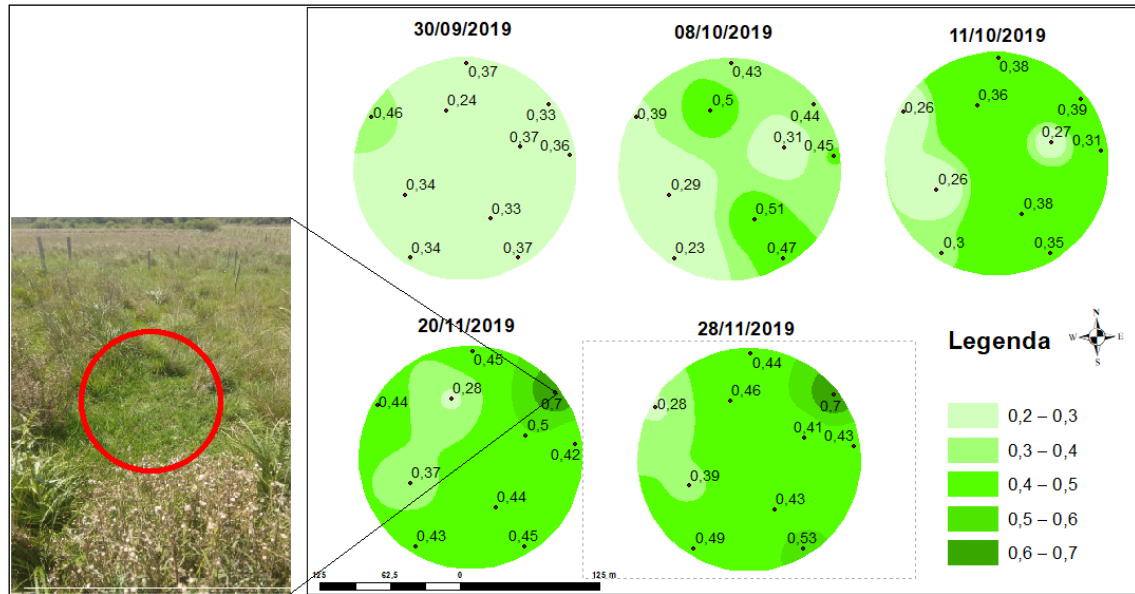
5.2 ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

5.2.1 Análise EVI2 (*Enhanced Vegetation Index 2*)

A análise do EVI2 considerou sua variação no espaço e no tempo. A distribuição espacial foi elaborada a partir do IDW (Inverse Distance Weighted). Quanto a espacialidade observa-se que há tendência do setor leste de a área de estudo apresentar valores mais altos de EVI2. Em relação a variação no tempo observa-se que houve aumento no valor de EVI2 no transcurso do período estudado. Os dias 20 e 28 de novembro apontam para que a cobertura do dossel esteja mais desenvolvida devido a um volume de precipitação (390 mm) registrado no período estudado (Figura 14).

A imagem também revela que a vegetação onde foram obtidas as medidas espectralradiométricas é de um tipo distinto de gramínea e visivelmente apresenta um tom de cor verde mais escuro do que as demais gramíneas do entorno.

Figura 14: Distribuição espaçotemporal do índice de vegetação EVI2 e em destaque o p01.

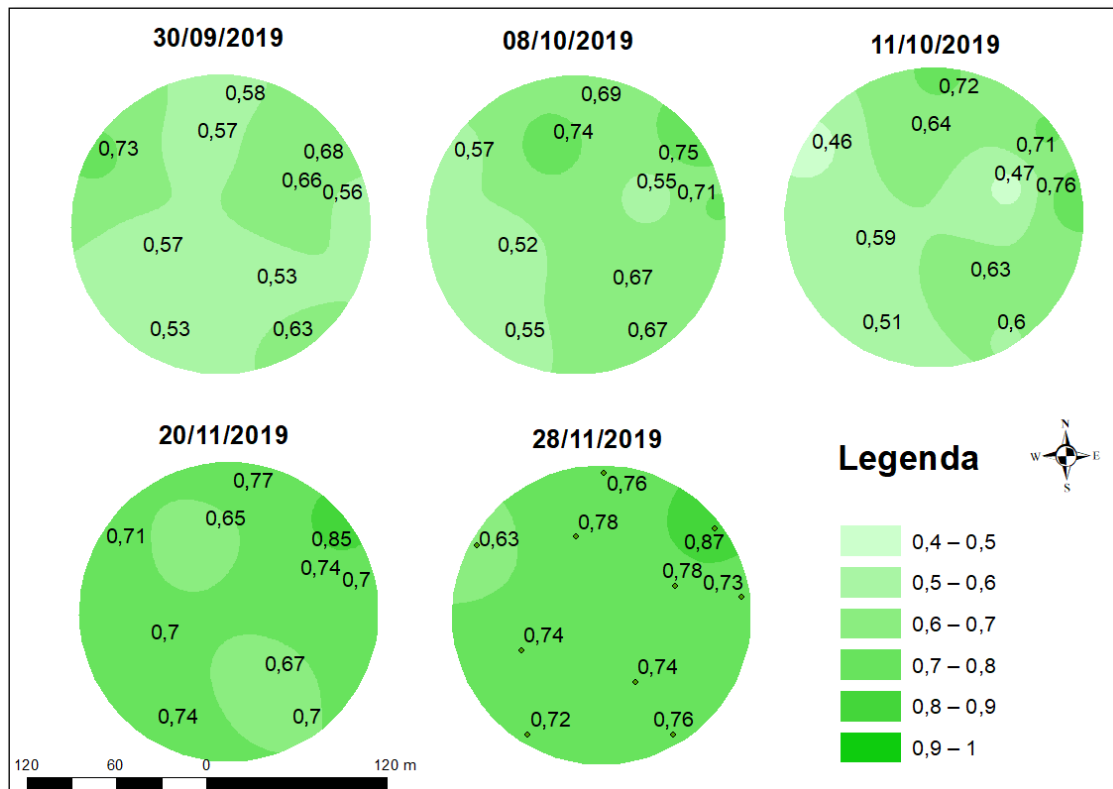


Fonte: autor

5.2.2 Análise NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

A análise do NDVI interpolado a partir do IDW (*Inverse Distance Weighted*), revelou uma evolução tanto no espaço quanto no tempo. Quanto a análise espacial, foi constatado que os valores mais baixos se apresentaram na parte central da área de estudo na maioria das datas analisadas. Os valores mais elevados mantiveram-se no setor leste, tais valores elevados deram-se por fatores intrínsecos na equação do NDVI que tem por característica apresentar maiores valores em relação a outros IVs (Figura 15). A consistência na evolução temporal revela que a medida que a umidade do solo é absorvida o valor do NDVI se eleva, exceto em alguns pontos, onde foi observada uma oscilação no valor do NDVI que pode dar-se também pela altitude do solo, em que regiões mais altas tendem a escoar mais facilmente a umidade recebida.

Figura 15: Distribuição espaçotemporal do índice de vegetação NDVI

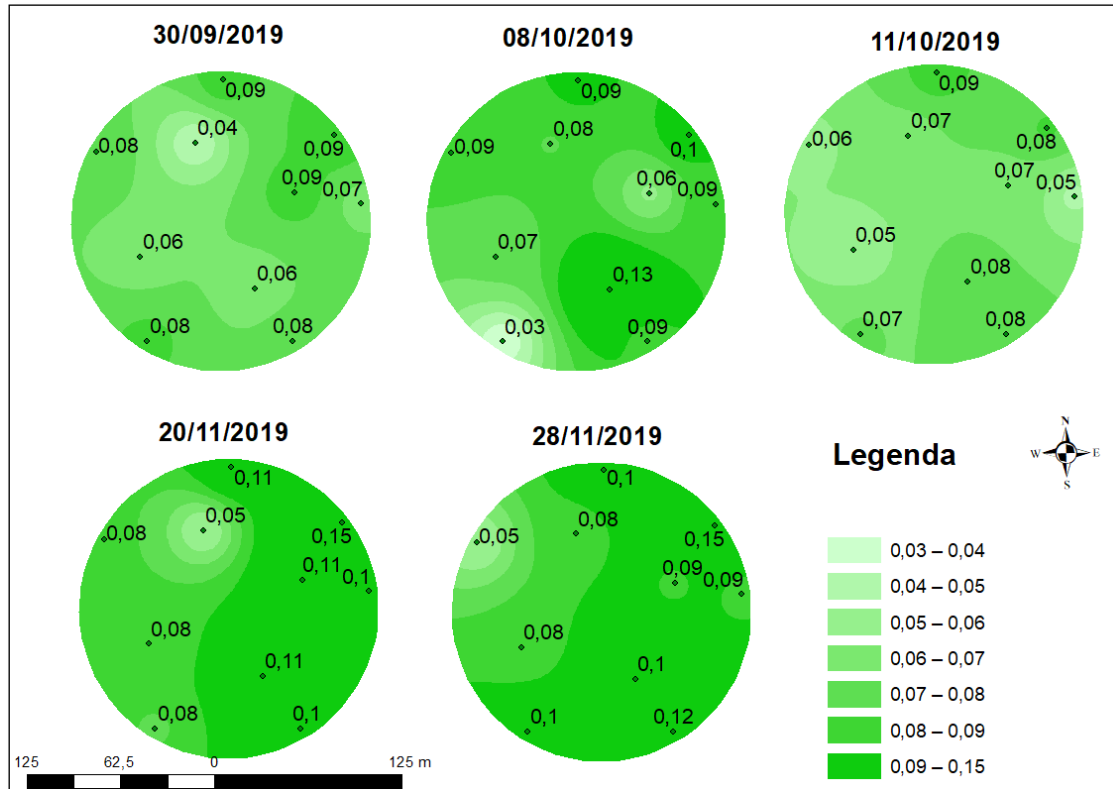


5.2.3 Análise TCARI (*Transformed Chlorophyll Absorption In Reflectance Index*)

Ao analisar a distribuição espaço temporal do TCARI (Figura 16), de forma geral foi observado a presença de valores baixos, esse fator pode ter como provável causa o fato do índice em questão utilizar em seu cálculo o comprimento de onda de 670 nm, que compreende a região de máxima absorção da clorofila inserido em um cálculo de razão dentro da equação do TCARI (Kim et al., 1994).

A ascensão no incremento do TCARI, temporalmente apresentou uma inconsistência entre os dias de 08 de outubro e 11 de outubro, pois observou-se uma diminuição dos valores na evolução do tempo e uma variação dos valores no espaço. Entretanto no 11 de outubro manifestou uma consistência na distribuição espacial, ou seja, apontou valores homogêneos e também valores mais elevados nos períodos seguintes.

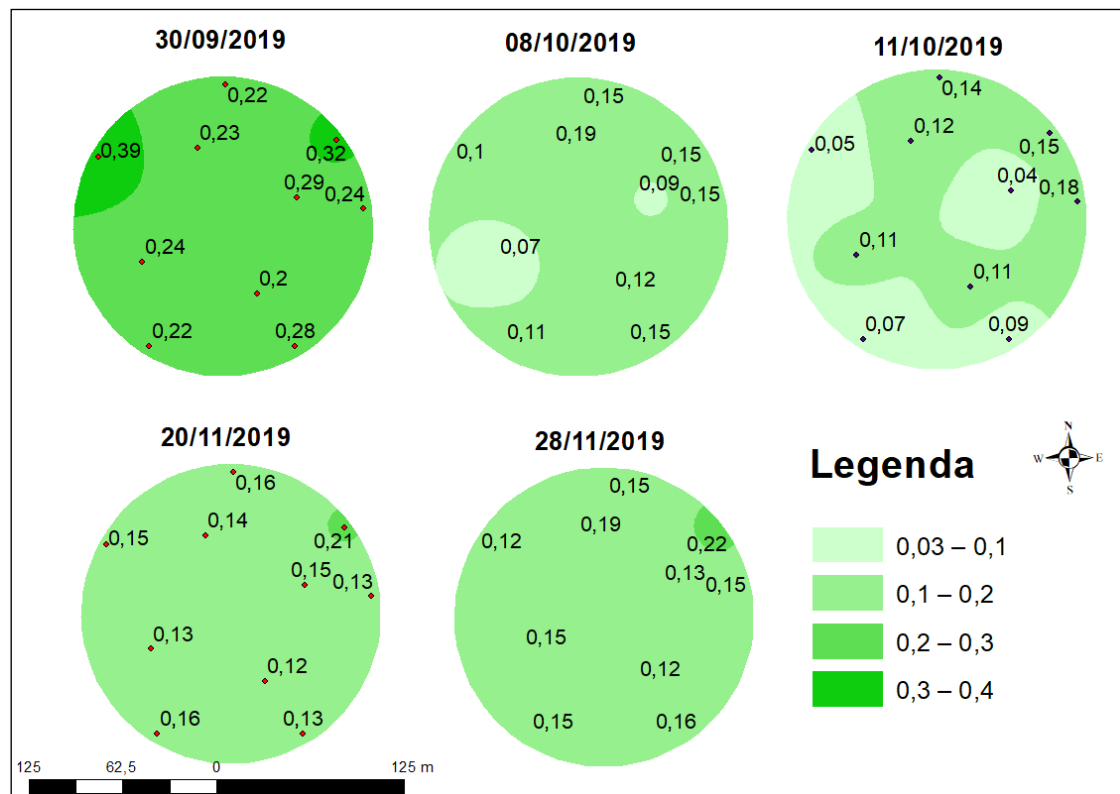
Figura 16: Distribuição espaço-temporal do índice de vegetação TCARI



5.2.4 Análise ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)

Ao observar o ARVI (Figura 17) distribuído no contexto temporal, é possível constatar que não existe uma consistência tanto entre si, pois no decorrer do tempo é notado que existem datas onde existe uma variância elevada entre os valores. Mas o ARVI apresentou-se neste estudo como uma variável que representa coerentemente o cenário espacial, apresentando valores próximos na sua distribuição. Nos demais IVs analisados anteriormente, ficou evidenciado uma evolução espaço-temporal, já o ARVI não foi possível notar uma proximidade ou evolução nos valores calculados. A interpretação dos resultados pode ser embasada segundo Kaufman e Tanré (1992), na alta sensibilidade do ARVI aos fatores atmosféricos.

Figura 17: Distribuição espaço-temporal do índice de vegetação ARVI



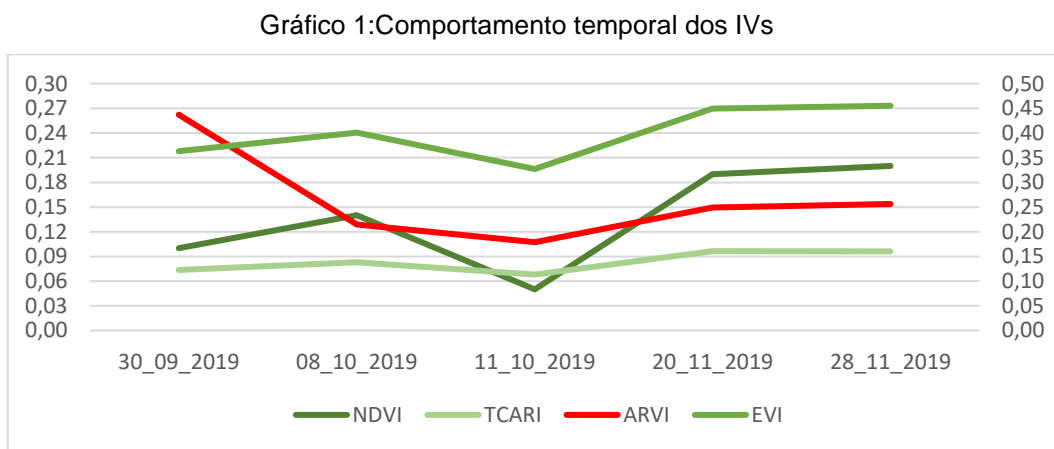
5.3 COMPORTAMENTO TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Define-se série temporal como qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, sendo classificadas em contínuas ou discretas (MORETTIN e TOLOI, 2006). Em sensoriamento remoto, uma série temporal pode ser amostrada em por meio de observações que são realizadas a intervalos de tempo regulares ou não. No caso das séries temporais dos índices de vegetação utilizados neste estudo, fez-se o processamento dos valores de reflectância coletados em cinco dias, escolhidos de forma não regular, uma vez que coletas de reflectância realizadas *in situ* dependem de condições climáticas favoráveis.

Dessa maneira, dados de séries temporais de sensoriamento remoto são uma ferramenta útil para identificar e caracterizar as dinâmicas dos ecossistemas terrestres, em escala temporal (LHERMITTE et al., 2011; ZHANG et al., 2013). Segundo Verbesselt et al. (2010) a análise de mudanças na cobertura terrestre por meio de componentes de tendência e de sazonalidade de séries temporais permite detectar diferentes tipos de alterações, as quais podem indicar

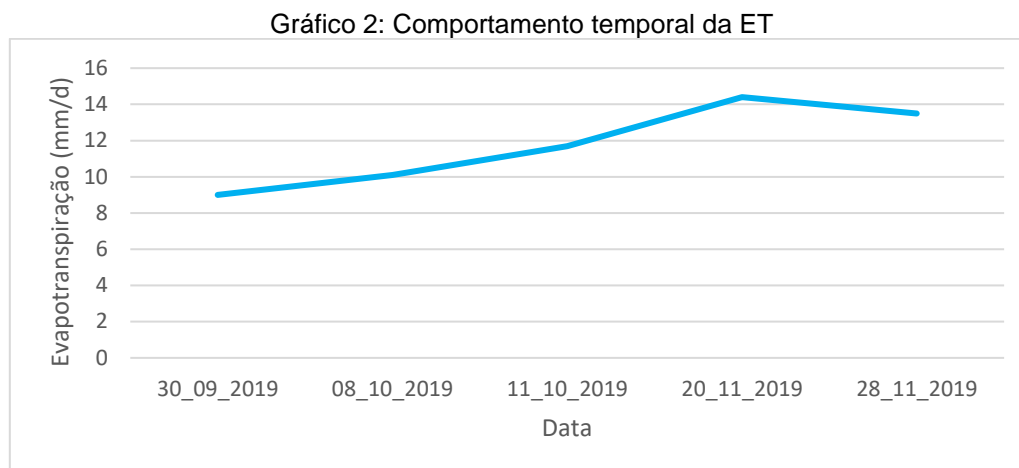
ocorrência de distúrbios, causados por fatores naturais ou antrópicos, como, por exemplo, fogo e ataque de insetos, que sob a componente sazonal, indicaria mudanças fenológicas.

O Gráfico 1 apresenta a série temporal dos IV e permite observar a sazonalidade. Mesmo que os IVs expressem valores distintos, existem períodos em que o NDVI, EVI2 e TCARI apresentam comportamento semelhante, com aumento e reduções nas mesmas datas. Já o ARVI se comportou de forma “anômala” em relação aos demais, fato que deve caracterizar os resultados de espacialização, correlação e dispersão.



5.3.1 Comportamento temporal da Evapotranspiração

Também foi confeccionado um gráfico com o comportamento temporal da ET que exprime visualmente a dinâmica (Gráfico 2). No gráfico percebe-se que existe uma crescente nos valores ao decorrer até a data de 20 de novembro, a partir desta data acontece um decréscimo na ET medida, pois no dia 28 de novembro foi observada essa redução. A redução deu-se por causa da redução de precipitação, pois foi constatado que houve um período de estiagem. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) desde o dia 7 de novembro não foram medidos valores de precipitação acumulados suficientes para manter umidade no solo, e com pouca umidade a ET apresentou tal redução.



5.4 CORRELAÇÃO E DISPERSÃO

5.4.1 Correlação

A correlação foi realizada a partir de valores médios de ET e IV nos períodos das coletas, no dia 30 de setembro a coleta foi realizada no período entre 09h e 13h 30, nos demais dias estudados as coletas foi considerado o período de 13h 30 até 17h 30. Foi confeccionada uma tabela (Tabela 2) com o objetivo de apresentar os resultados oriundos das comparações entre as variáveis estudadas. A observação principal deve ser exercida sobre os coeficientes de correlação exibidos e a comparação deve dar se entre ET/EVI2, ET/NDVI, ET/TCARI e por fim ET/ARVI.

Tabela 2: Valores de correlação

	ET	EVI2	NDVI	TCARI	ARVI
ET	1	0,6	0,8	0,7	-0,2

Ao analisar diretamente a matriz de correlação é necessário que haja uma classificação dos coeficientes de correlação. A existência da classificação se faz indispensável para que além de valores numéricos, o nível de correlação possa conter uma subdivisão capaz de divulgar o resultado dos intervalos não somente em números, pois apenas com a classificação numérica haveria apresentação subjetiva do nível de correlação existente. Abaixo é apresentada a (Tabela 3) contendo a classificação que é interpretada considerando cinco intervalos.

Tabela 3: Interpretação do coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação (r)	Classificação
0 – 0,1	Muito baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito alta
0,9 – 1	Quase perfeita

Fonte: Adaptado de Hopkins (2000)

5.4.2 Evapotranspiração X EVI2

Ao analisar a correlação entre ET e EVI2 foi averiguado que o coeficiente de correlação apresentou um valor de 0,6, interpretado como uma correlação moderada. O EVI2 utiliza em sua equação apenas as bandas do vermelho e infravermelho próximo não utilizando a banda do azul, presente no cálculo original do EVI. A faixa espectral do azul é responsável pelas distorções causadas pela atmosfera Huete et al (2002), e a ausência da banda correspondente ao azul, contribuiu para que o coeficiente de correlação apresentasse um valor positivo, pois o método de estimativa de evapotranspiração utiliza indiretamente o balanço de energia de variáveis em nível terrestre e próximos aos sensores instalados na torre, portanto, não sofrendo qualquer influência atmosférica.

5.4.3 Evapotranspiração X NDVI

O coeficiente de correlação de 0,8 entre ET e NDVI, maior dentre os IVs calculados, expressa a existência de uma correlação classificada como forte entre ambas. A interpretação deste fato deve dar-se pela atividade fotossintética da vegetação, pois segundo Diaz (2018) o valor do fluxo de calor latente (LE) intercepta a água transpirante e evapotranspirante acima do dossel, logo o NDVI contribui no cálculo de normalização tanto com valor de brilho do solo, quanto com o valor de reflectância de dossel, ou seja, contribui com valor de transpiração e evaporação, justificando o nível de correlação calculado.

5.4.4 Evapotranspiração X TCARI

O TCARI apresentou o segundo maior coeficiente de correlação com ET e com valor de 0,7, com classificação considerada como um nível de correlação forte. Apesar de apresentar valores menores do que o NDVI, as bandas representam melhor a atividade fotossintética explicadas pelas bandas utilizadas no cálculo. Isso demonstra que quanto mais a taxa de ET se eleva à medida que os pigmentos fotossintéticos aumentam sua atividade e a banda de 700 nm responsável pela absorção da clorofila também.

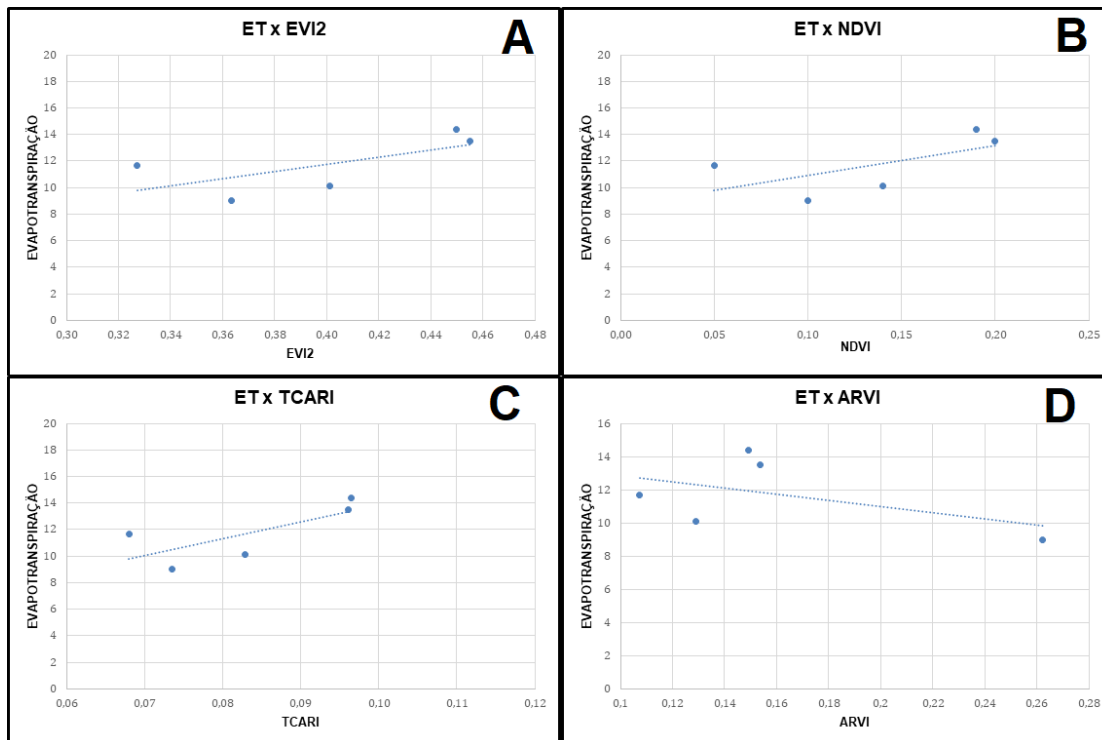
5.4.5 Evapotranspiração x ARVI

A correlação quase nula, com coeficiente de correlação -0,2 entre ET e ARVI, de uma forma geral, pode dar-se pelo fator de correção inserido a priori no cálculo de razão. A correção Prb, é uma técnica que visa corrigir o espalhamento molecular e para absorção do ozônio, logo o LE obtém seus valores de moléculas de água que são liberadas para a atmosfera e tal cálculo de correção deve minimizar este efeito, justificando a correlação quase nula.

5.5 DISPERSÃO DOS DADOS

Os gráficos de dispersão são utilizados para pontuar dados distribuídos nos eixos vertical e horizontal com intenção de apresentar a influência de uma variável sobre a outra. Se os marcadores são apresentados de modo que a linha de tendência está próxima e entre eles no gráfico de dispersão, isso indica que existe uma alta correlação. Se os marcadores estiverem distribuídos longe da linha de tendência do gráfico de dispersão, a correlação pode ser baixa ou nula (TIBCO, 2019), (Figura 18).

Figura 18: Gráficos de dispersão ET (mm/d) e IV



A dispersão dos pontos apresentada nos gráficos exprime visualmente o que o coeficiente de correlação explica em números. O gráfico de dispersão letra “A” revela pontos distribuídos, próximos a linha de tendência e entre si, que indica uma relação entre ET e EVI2. O gráfico “B” se apresenta semelhante ao gráfico “A”, entretanto constatou-se um coeficiente de correlação entre ET e NDVI superior no gráfico “B”, expresso pelo fato de exibir maior proximidade dos pontos. Uma proximidade entre os pontos também é notada no gráfico “C”, a menor dispersão dos dados é avaliada pela observação dos intervalos, mas por exibir uma inclinação mais acentuada apresenta menor coeficiente de correlação quando comparado ao gráfico “B”. Por não existir correlação entre ET e ARVI nota-se no gráfico que não existe aproximação tanto junto a linha de tendência, quanto na distribuição dos pontos.

6. CONCLUSÃO

Ao observar o contexto sob a ótica do tempo e do espaço foi possível visualizar aspectos que apontam uma consistência na construção dos valores dos IVs. A inspeção visual dos espectros de reflectância coletados enfatizou a

distinção da resposta espectral da vegetação, caracterizando a cobertura vegetal do bioma pampa. A análise visual dos mapas demonstrou que no estudo em questão foi constatado um crescimento ao longo do tempo nos valores de EVI2, NDVI e TCARI. Porém o ARVI demonstrou ser um IV instável, com variação de valores considerando a dinâmica temporal. Os demais índices apresentaram menor variação de seus valores no decorrer do tempo e pouca variação no espaço.

A tabela de correlação possibilitou a observação de coeficientes que expressam a influência entre duas variáveis. Os valores dos coeficientes de correlação demonstraram-se satisfatórios para o objetivo do estudo, apontando uma tendência entre as variáveis que pode ser observada nos gráficos de dispersão. Tal tendência revela que é possível estimar valores de evapotranspiração apoiados em valores de reflectância convertidos em IV. Entretanto, novas missões de campo deverão ser realizadas com a finalidade de aumentar o “n” amostral, ou seja, o número de missões de campo. No prosseguimento do estudo o ARVI deve ser descartado ou substituído por outro IV, em razão de que seu nível de correlação foi classificado como “bem fraca”, não apresentando qualquer influência entre seus valores e valores estimados de ET. Devem ser mantidos o EVI2, NDVI e TCARI, visto que a interpretação dos coeficientes de correlação indicaram níveis cuja a classificação varia entre “moderado e forte”.

Em contexto geral o estudo indicou a direção que deve ser seguida para o cumprimento do objetivo, apontando que IV é uma variável que deve ser associada a evapotranspiração e sua dinâmica no espaço e no tempo.

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS: MANUAL de USOS CONSUNTIVOS da ÁGUA no BRASIL. Brasília: Comitê de Editoração, 2019. 75 p. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2019.

AGROSMART. Entenda a disponibilidade hídrica e a evapotranspiração no Brasil. Disponível em: <<https://agrosmart.com.br/blog/clima/disponibilidade-hidrica-evapotranspiracao/>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

ALLÉGRE, C.; REIS, M. J. ECOLOGIA DAS CIDADES, ECOLOGIA DOS CAMPOS. Disponível em: <https://www.instituto-camoes.pt/images/stories/tecnicas_comunicacao_em_portugues/Geografia/Geografia%20-%20Os%20ciclos%20da%20agua.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2019.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration (FAO Irrigation and Drainage Paper 56), Roma: FAO, p. 326, 1998.

ALVES JÚNIOR, J. EVAPOTRANSPIRAÇÃO. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/up/68/o/05_aula_Evapotranspiracao.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

ANDRADE JÚNIOR, A.S., BASTOS, E.A., SENTELHAS, P.C, SILVA, A.A.G.DA. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. Revista Brasileira de Agrometeorologia 11, 63-68 2003.

ARAUJO, G. L. **ESTIMATIVAS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRODUTIVIDADE DO MILHO IRRIGADO UTILIZANDO UM MODELO MULTIESPECTRAL E IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT 8**. 2016. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

ARYA, S. P.; HOLTON, J. Introduction to Micrometeorology. 2nd. ed. San Diego – California: 2001.

ATAÍDE, K, R, da P. **Modelagem de determinação da evapotranspiração real para o bioma cerrado por meio de dados de sensoriamento remoto orbital**. 2012. 193 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

AYOADE, J. O. Introdução à Climatologia para os Trópicos. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.a., 332 p, 1996.

BALDOCCHI, D. et al. The impact of expanding flooded land area on the annual evaporation of rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 223, p. 181–193, 2016.

BAUTISTA, F. et al. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmosfera*, v. 22, n. 4, p. 331-348, 2009.

BENAVIDES, J.G.; LOPEZ DIAZ, J. Fórmula para el cálculo de La evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S). *Agronomia Tropical*, Maracay, v. 20, n. 5, p.335-345, 1970.

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 5. ed. Viçosa: Ed: Imprensa Universitária, p. 596, 1989.

BOMFIM, G. V. do; AZEVEDO, B. M. de; VIANA, T. V. de A.; BORGES, R. L. M.; CARLSON, T. An overview of the “Triangle Method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, Basel, v.7, p.1612-1629, 2007.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, v. 106, n.2, p. 137-145, 2007.

CAMARGO, Â. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração POTENCIAL. *Scielo*, Campinas, v. 59, n. 2, p.125-137, jul. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006870520000002002>. Acesso em: 15 jul. 2019.

CARLSON, T. An overview of the “Triangle Method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, Basel, v.7, p.1612-1629, 2007.

CARLSON, T.N. & RIPLEY, D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3):241-252,1997.

CARUZZO, A., ROCHA, H.R. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) em Regiões de Pastagem e Floresta com um método indireto (‘gap fraction’) durante o Experimento AMC/LBA-1999. Artigo online: <http://lba.cptec.inpe.br/publications/>, disponibilizado em 2003. acesso: Dez. 2019.

CARVALHO, C. A. L. de et al. TÓPICOS EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS. Cruz das Almas: Gráfica e Editora Nova Civilização Ltda., p. 296, 2009.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *pesquisa agropecuária tropical*, Goiânia, v.41, n.3, p.456-465, 2011. Disponível em: <<http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/12760/9732>>. Acesso em: 19 jul. 2019.

CARVALHO, L.G.; RIOS, G.F.A.; MIRANDA, W.L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 41, p. 456-465, 2011.

CHAVÉZ, J. L.; NEALE, C. M.; PRUEGER, J. H.; KUSTAS, W. P. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. *Irrigation Science*, p. 67-81, 2008.

CHEN, Y.-Y.; CHU, C.-R.; LI, M.-H. A gap-filling model for eddy covariance latent heat flux: Estimating evapotranspiration of a subtropical seasonal evergreen broad-leaved forest as an example. *Journal of hydrology*, v. 468, p. 101–110, 2012.

COHEN, W. B.; MAIERSPERGER, T. K.; GOWER S. T.; TURNER, D. P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, v.84, p.561-571, 2003.

COSTA, B. C. P. da. **Sensoriamento Remoto em Suporte ao mecanismo de desenvolvimento limpo (Mdl) em manguezais do litoral setentrional do Rio Grande Do Norte, Brasil.** 2016. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

COSTA, M.C. Estimativa da Evapotranspiração Regional por Meio de Imagens Orbitais. Viçosa. MG: UFV. 1997, 52p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.

DA ROCHA, I. P.; DA SILVA LIMA, N.; CHAGAS, R. M.; DE ALMEIDA, G. L. P. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Garanhuns, PE. *Revista Geama*, Recife, v. 2, n. 1, p. 25-40, 2016.

DIAZ, M. B. **Análise das componentes dos fluxos superficiais de massa e energia na região sul do Brasil.** Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. 155 f. 2018.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, p.178, 1984.

DORIGO, W. A.; MILLA, R. Z.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.9, p.165-193, 2007.

ELTAHIR, E. A. B., "A soil moisture-rainfall feedback mechanism, 1. Theory and observations", *Water Resources Research*, v. 34, n. 4, p. 765 – 776, 1998.

ENGMAN, E. T. Remote Sensing. In: *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, p. 24.1 – 24. 23, 1993.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

EPIPHANIO, J. C. N.; KRUG, T.; FORMAGGIO, A. R. Monitoramento ambiental e sensoriamento remoto na América Latina. In: BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. (Org.). *Geoinformação e monitoramento ambiental na América Latina*. São Paulo: Editora Senac. cap. 2, p. 53-89, 2008.

FERNANDES, C.L. **Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão -RJ**. 2006. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

FERNANDES, D. S. et al. Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos. 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/29024/1/doc263.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2019.

FERREIRA, J. M. S.; FERREIRA, P. S.; MORAIS, Y. C. B.; GOMES, V. P.; FRANÇA, L. M. A.; GALVÍNCIO, J. D. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de mudanças espaço-temporais das áreas de vegetação de mangue em Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 06, n. 03, p. 356-372, 2013. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/683>> Acesso em: 02 jan. 2020.

FREVERT, D. R.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

FUZZO, D. F. **S. ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRODUTIVIDADE DA SOJA UTILIZANDO O MÉTODO DO TRIÂNGULO SIMPLIFICADO**. 2015. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2015.

GAO, B. NDWI - Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, New York, USA, v. 58, p. 257-266, 1996.

GRISMER, M. E. et alli. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 128, n. 3, p. 180-184, 2002.

HAMON, W. R. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division ASCE, Nova Iorque*, v.87, n. HY3, p.107-120, 1961.

HARGREAVES, G.H. *Climate and irrigation requirements for Brazil*. Logan: Utah State University, p.44, 1976.

HARGREAVES, G.H. *Precipitation dependability and potentials for an agricultural production for Northeast Brazil*. Cusushash: EMBRAPA and Utah State University, p.123, 1974.

HARGREAVES, G.H. *Water requirements manual for irrigated crops and rainfed agriculture*. Logan: Utah State University, p.41, 1977.

HOPKINS, W. G. *Correlation coefficient: a new view of statistics*. 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 02 jan. 2020.

IRMAK, S. et al. Evaluation of classe A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 128, n. 3, p. 153-159, 2002.

ISMAEL FILHO, A. et al. Influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração. *Gaia Scientia, João Pessoa*, v. 9, n. 1, p.62-66, abr. 2015.

JENSEN, J.R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo et. al. São José dos Campos. SP. Ed. 1, p.244, 2009.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York: American Society of Civil Engineers, p. 332, 1990.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drain Engineering*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.89, p.15-41, 1963.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, v. 112, p. 3833-3845, 2008.

JONES, H. G. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. New York: Cambridge University Press, 1992. 428 p.

JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J.R.G.; DEFRIES, R.; ROY, D.P.; HALL, D.K.; SALOMONSON, V.V.; PRIVETTE, J.L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R.B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S.W.;

NEMANI, R.R.; ZHENGMING, W.; HUETE, A.R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R.E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M.J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v.36, p.1228-1249, 1998.

KASHY AP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, Aug. 2001.

KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Trans. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992.

KHARRUFA, N. S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten, Sonderheft. v.5.1, p.39-47, 1985.

Kim, m., Daughtry, C. S., Chappelle, E. W., MacMurtrey III, J. E. and C. L. Walthall, 1994, "The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR), proceedings, 6° symposium on physical measurements and signatures in remote sensing, Val Dísere, France, 299 – 306, Jan.17.

LEITE, M. R.; SILVA, J. L. Avaliação de desempenho entre modelos de obtenção de temperatura de superfície por sensores remotos, Revista Eletrônica de Geografia, v.4, n.12, p.73-89, dez. 2012.

LOPES FILHO, R.P. **Utilização de diferentes tanques evaporimétricos em ambiente protegido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, p. 79, 2000.

MAKKINK, G. F. Ekzamento de la formulo de Penman. Netherlands Journal of Agricultural Science, Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: UFRGS. p. 31-39, 1992.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Piraipaba, CE.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba, SP. p. 103, 2002.

MEDINA, J.L.; E. CAMACHO; J. RECA, R. LÓPEZ; J. ROLDÁN. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS. Physical Chem. Earth, v. 23, n. 4, p. 427-432, 1998.

MENESES, P.R; ALMEIDA, T. (org.), Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto: 1. ed. Brasília: UnB/CNPq, 2012.

Ministério do Meio Ambiente (Org.). Ciclo Hidrológico. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico.html>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEN, B.N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, n.78, p. 284-298, 2001.

MOHAMED, Y. A., BASTIAANSSES, W. G. M, SAVENIJE, H. H. G, “Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques”, *Journal of Hydrology*, v. 289, pp. 145 – 164., 2004.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Análise de séries temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2a ed., 544 p, 2006.

MOTT, G.O.; MOORE, J.E. Forage evaluation techniques in perspective. In: BARNES, R.F. et al. (Ed.). *Forage quality evaluation and utilization*. Nebraska: Nebraska Center for Continuing Education. P.L1-L10, 1970.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, v. 111, n. 4, p. 519–536, dez. 2007.

NOVO, E.M. L. M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. Edição revista 4. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

OLIVEIRA, T.H., SILVA, J.S., MACHADO, C.C.C., GALVÍNCIO, J.D., NÓBREGA, R.S., & Pimentel, R.M.M. Detecção espaço-temporal de estresse hídrico na vegetação do semi-árido no nordeste do Brasil utilizando NDVI e NDWI – Estudo de caso Serra da Capivara e Serra do Congo–PI. VI Seminário Latino Americano de Geografia Física-II Seminário Ibero Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, 2010.

ORHAN, O. ; EKERCIN, S.; DADASER-CELIK, F.. Use of Landsat Land Surface Temperature and Vegetation Indices for Monitoring Drought in the Salt Lake Basin Area, Turkey. *The Scientific World Journal*, v. 2014, p. 1-11, 2014.

OTSUKI, Rodrigo Gomes. **ESTIMATIVA DE SÉRIES ANUAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E VAZÃO EM BACIAS SEM MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO COM BASE NAS HIPÓTESES DE BUDYKO**. 2015. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PAIVA, C. M.; Tsukahara, R. Y.; França, G. B.; Nicacio, R. M. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 101-107.

PAULA, V. H. N. de et al. Análise da evapotranspiração (et) e do índice de vegetação melhorado (evi) para o município de BOTUCATU-SP por meio de dados do sensor MODIS. 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/LabGeoTec/Desktop/artigo_23.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2019.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, London, v. 193, p. 120–145, Abri. 1948.

PEREIRA, A. R. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações. Guaíba: Agropecuária Ltda, 478, 2002.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, p.183, 1997.

PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (org) Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação, São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed. p.111-118, 2007.

QUADROS, F. L. F. de et al. **Os Campos do Sul: cuidar e fazer diferente.** Porto Alegre, 196 p. 2015.

RÊGO, S. C. A.; LIMA, P. P.S.; LIMA, M. N. S.; MONTEIRO, T. R. R. Análise Comparativa dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI no município de São 70 Domingos do Cariri-PB. Revista GEONORTE, edição especial, v. 2, n.4, p. 1207 - 1229, 2012. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/2738697-Analise-comparativa-dos-indices-de-vegetacao-ndvi-e-savi-no-municipio-de-sao-domingos-do-cariri-pb.html>> acesso em: 16 jul 2017.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo:Manole, p.188, 1990.

ROMANENKO, V. A. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Kiev: Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, p.3, 1961.

RONDEAUX, G; STEVEN, M; BARET, F. Optimization of soil- adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment, v.55, p 95–107, 1996.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in te great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington: [s.n.], Cap. Sec A, v. 1, p. 309-317, 1973.

RSI (Research Systems, Inc). ENVI User's Guide. ENVI Version 4.0 September, 2003.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 162p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; ARAGÃO, L.E.O.C.; ROCHA, H.R., MALHI, Y.S. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for 86 clear-sky days in brazilian Tropical Savannas. *Remote Sensing*, v. 4, n. 12, p. 703-725, 12 mar. 2012.

SADO, R. R.; WARREN, M. S.; ROIG, H. L. Estimativa de irrigação por meio de sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Alto São Marcos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 70, n. 3, p.787-802, set. 2018. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/45700/24642>>. Acesso em: 5 fev. 2020.

SALMONA, Yuri. EVI: O que é? Como interpretar? Disponível em: <<https://www.espectrogeo.com.br/evi-o-que-e-como-interpretar/>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

SAUSEN, T. M. SENSORIAMENTO REMOTO E SUAS APLICAÇÕES PARA RECURSOS NATURAIS. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

SHIMABUKURO, Y.E. Índice de Vegetação e Modelo Linear de Mistura Espectral no Monitoramento da região do Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, p.1729-1737, 1998.

SILVA, V.; ADELMO M. Meteorologia e Climatologia. Disponível em: <file:///F:/livros_agrometeorologia/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006-desbloqueado.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2019.

SINHA, P.; KUMAR, L. Independent two-step thresholding of binary images in inter-annual land cover change/no-change identification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. v. 81. p. 31-43, 2013.

SMITH, M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome: FAO, p.45, 1991.

SMITH, M.; ALLEN, R.; PEREIRA, P. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, 1996, San Antonio. Proceedings... San Antonio: American Society of Agricultural Engineers. p. 116-123, 1996.

SOUZA, V. de A. **Validação de métodos de evapotranspiração e parametrização de um modelo a partir de dados in situ e remotos para cultivos de arroz irrigado no sul do Brasil.** 2017. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

STAGNITTI, F.; PARLANGE, J.-Y.; ROSE, C.W. Hydrology of a small wet catchment. *Hydrol. Sci.*, 3: p.137-150. 1989.

STULL, R. *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, 1998.

SULFLUX. **Características dos sítios experimentais.** Disponível em: <<http://www.sulflux.ufsm.br/sulflux/wp-content/uploads/Caracteristicas-dos-sitios-experimentais.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2020.

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 65, n.10 p. 3391-3413, 1960.

TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of Land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 2, p. 51-63, 2008.

TIBCO. O que é um Gráfico de Dispersão. Disponível em: <https://docs.tibco.com/pub/spotfire_web_player/6.0.0-november-2013/ptBR/WebHelp/GUID-780960FA-1DCE-4E59-8EB7-54F7144DB362.html>. Acesso em: 04 ago. 2019.

VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, v. 114. p. 106-115. 2010.

WAN, Z. et al. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, Florence, v. 25, p. 61-72, 2004.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. DE C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 07, n. 01, p. 065-082, 2011.