



SARAH FRANCO PINTO

**ANOMALIAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O
QUADRANTE NOROESTE-NORDESTE DE MINAS GERAIS:
USO DE DADOS DE ASSIMILAÇÃO E DADOS IN SITU**

**LAVRAS – MG
2021**

SARAH FRANCO PINTO

**ANOMALIAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O
QUADRANTE NOROESTE-NORDESTE DE MINAS GERAIS:
USO DE DADOS DE ASSIMILAÇÃO E DADOS IN SITU**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho

Orientador

LAVRAS – MG

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus por ter me ajudado a vencer todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

Aos meus pais, Marcelo e Célia, que não mediram esforços para tornar possível a realização desse sonho, onde mesmo sem condições fizeram de tudo para que eu chegasse onde estou hoje. Á minha irmã Raquel, pelo suporte constante nos momentos mais difíceis e por ter me dado minha maior alegria, a Helena. Ao meu irmão Samuel por, muitas vezes, deixar o sono e o conforto em segundo plano para trabalhar e ajudar a sustentar nossa família. A minha avó Ilza, por ser minha segunda mãe e ter atendido todas minhas ligações, me acalmando nos momentos de crise. Ao meu namorado Samuel por ter me ajudado a não desistir, pelo apoio, carinho, companheirismo, por me passar tanta paz e me fazer enxergar sempre o lado bom da vida. Á minha Tia Rosângela, por ter acreditado que eu retornaria e conseguiria finalizar o curso, por ter financiado minha graduação e meus tratamentos. Á minha Tia Adail e minha prima Nancy por estarem sempre presentes, por sempre torcerem e cuidarem de mim, mesmo à distância

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Vieira Filho, por acreditar no meu trabalho, no meu potencial e por ter me auxiliado até aqui. Agradeço pelo tempo disposto em me ensinar e por ter me feito chegar além do que achei ser capaz. Pela ajuda e paciência com a qual guiou o meu aprendizado. Agradeço também porque sem a ajuda do mesmo não teria me encontrado no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária.

Ao Núcleo de Estudos em poluição Urbana Atmosférica e Agroindustrial (NEP-UAI), por ter me acolhido no momento que retornei à universidade, e estava perdida, pensando que não seria capaz de finalizar a graduação. Sou muito grata a cada integrante do núcleo. Tenho convicção que sem o apoio, carinho e ajuda de cada um, não conseguiria desenvolver esse estudo.

Aos membros da banca, que dedicaram seu tempo à leitura do meu trabalho, contribuindo com seus conhecimentos e experiências diversas.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A evapotranspiração, após a precipitação, é o maior componente do balanço hídrico terrestre, sua estimativa é crucial para compreender o balanço hídrico e desenvolver planos de recursos hídricos de forma eficaz. Com clima quente e seco, o denominado quadrante noroeste/nordeste de Minas Gerais se mostra frágil às anomalias de evapotranspiração. Ademais, a ocupação da área por populações com economias pouco desenvolvidas e dependentes das atividades agrárias podem limitar a capacidade das populações frente às necessidades de adaptação às possíveis mudanças climáticas, colocando a região em situação de vulnerabilidade. O presente estudo estimou as anomalias referentes à evapotranspiração, a partir da série histórica do período de 2009 a 2018 em comparação com as normais climatológicas referentes as estações meteorológicas do quadrante NE e NW do quadrante NE e NW do Estado de Minas. Utilizou-se também o método do Inverso da distância Ponderada (IDP) para espacialização dos dados obtidos. Por fim, extraiu-se dados do sistema de assimilação de dados terrestres (FLDAS) e realizou-se uma análise estatística. As medições *in situ* mostraram que a maior parte das estações apresentaram anomalias negativas em todos os meses do ano, sugerindo uma intensificação dos períodos de seca, corroborando com as projeções de cenários futuros que indicam possíveis alterações dos tipos climáticos, com climas mais quentes e secos. Através da interpolação foi possível avaliar a espacialização das anomalias de evapotranspiração e identificar uma tendência de diminuição gradual dos valores de anomalias do Leste para Oeste no norte de Minas, de julho a setembro, período seco de inverno (julho/ agosto) e início da primavera (setembro), da faixa dos 11 a 27 mm.mês⁻¹ para a faixa -133 a 117 mm.mês⁻¹. Os resultados também validaram, através dos índices estatísticos erro quadrático médio (RMSE) e viés (BIAS), a aplicabilidade da substituição de medições das anomalias de evapotranspiração *in situ* por dados do FLDAS nos períodos no verão e início do outono (março/abril) onde, as estimativas de BIAS E RMSE apresentaram os menores valores. Espera-se que a pesquisa possibilite a adoção de estratégias eficazes e elaboração de políticas públicas que visem mitigar os efeitos das anomalias de evapotranspiração, principalmente nos períodos onde as anomalias foram mais intensas (julho a setembro), de forma a garantir a oferta de água para abastecimento público, bem como para as práticas agrícolas.

Palavras chave: Evapotranspiração. Anomalias climatológicas. Norte e Noroeste de Minas Gerais. Sistema de assimilação de dados

ABSTRACT

Evapotranspiration, followed by precipitation, is the largest component of the terrestrial water balance, its estimative is crucial to understand the water balance and develop water resource plans effectively. With a warm and dry climate, the so-called northwest / northeast quadrant of Minas Gerais is susceptible to evapotranspiration anomalies. In addition, the occupation of the area by populations with poorly developed economies and dependent on agrarian activities may limit the population's capacity to adapt for climate changes scenarios, highlighting its vulnerability. The present study estimated the anomalies related to evapotranspiration, from the historical series of the period from 2009 to 2018 in comparison with the climatological normals of the NE and NW quadrant of the State of Minas, the Weighted Distance Inverse (IDW) method was also used to spatialize the data obtained. Finally, data were extracted from the terrestrial data assimilation system (FLDAS) and a statistical analysis was performed. In situ measurements showed that most seasons showed negative anomalies in all months of the year, suggesting an intensification of drought periods, corroborating with projections of future scenarios that indicate possible changes in climatic types, with warmer and drier climates. Through interpolation, it was possible to assess the spatialization of evapotranspiration anomalies and to identify a trend of gradual decrease in anomaly values from East to West in the north of Minas, from July to September, dry winter and early spring, in the range of 11 at 27 mm.month^{-1} for the range -133 to $117 \text{ mm.month}^{-1}$. The results also validated, through the statistical indexes mean square error (RMSE) and bias (BIAS), the applicability of replacing measurements of evapotranspiration anomalies in situ with FLDAS data in the summer and early autumn periods (March / April) where, the BIAS AND RMSE estimates showed the lowest values. Our results emphasize the importance of effective strategies and the elaboration of public policies to mitigate the effects of evapotranspiration anomalies, mainly in periods where as anomalies were more intense (July to September), in order to ensure the supply of water for public supply, as well as for agricultural practices.

Keywords: Evapotranspiration. Climatological anomalies. North and Northwest of Minas Gerais. Data Assimilation System

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Modelo de Estação Meteorológica Convencional (a) e Automática (b).....	4
Figura 2- Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico	5
Figura 3. Relação entre a capacidade de água disponível (CAD) e a textura do solo.	8
Figura 4. Equilíbrio da troca de moléculas de água entre uma superfície de água e o ar.....	9
Figura 5- Distribuição espacial das Estações do INMET e as mesorregiões que abrangem o quadrante NE e NW do Estado de Minas Gerais.	16
Figura 6- Anomalias mensais de evapotranspiração (mm.mês ⁻¹) por estação no período de 10 anos	26
Figura 7- Distribuição espacial das anomalias de evapotranspiração (mm.mês ⁻¹) para o norte de Minas Gerais.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do quadrante noroeste/ nordeste de Minas Gerais.	17
Tabela 2 - Porcentagem de cobertura de dados das estações meteorológicas do quadrante noroeste/nordeste de Minas Gerais da década de 2009 a 2018 contendo os elementos meteorológicos selecionados e suas respectivas coordenadas geográficas.	22
Tabela 3 - Comparação entre as anomalias das estações meteorológicas e anomalias Giovanni NASA e o erro quadrático médio (RMSE) e viés (BIAS).....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Elementos Meteorológicos.....	2
2.2. Balanço Hídrico Climatológico.....	5
2.2. Evapotranspiração	8
2.2.1.Evapotranspiração Real	10
2.2.2.Evapotranspiração de Referência	10
2.2.3.Evapotranspiração de Cultura.....	11
2.3. Métodos de Interpolação Espacial.....	12
2.4. Dados de Assimilação	14
3. METODOLOGIA.....	15
3.1. Área de estudo	15
3.2. Inverso da Distância Ponderada	19
3.3. Dados de Assimilação	19
3.3.1. Análise Estatística	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1. Representatividade da Série Histórica.....	20
4.2. Anomalias mensais de Evapotranspiração	25
4.3. Interpolação das anomalias de evapotranspiração na mesorregião Norte de Minas Gerais.....	29
4.4. Dados de Assimilação do FLDAS.....	31
5. CONCLUSÃO	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico corresponde ao fenômeno global de circulação fechada da água no ambiente de forma dinâmica na qual, por compreender diferentes estados físicos (sólido, líquido e gasoso) passa por transformações contínuas de um estado para o outro sendo transportada entre os reservatórios naturais: oceanos, atmosfera e continentes (TUCCI, 2000; JORDAN GROTZINGER; ABREU, 2006)

Sob certas condições de temperatura, a água é evaporada do solo, rios, lagos, oceanos, e transpirada pelas plantas passando para a atmosfera e, posteriormente, condensa dando origem a precipitação atingindo, dessa forma, a superfície terrestre. Em seguida, escoando retornando aos reservatórios ou infiltra no solo, o que possibilita, ao percolar, a recarga de aquíferos e abastecimento de nascentes (MARTINS, 2019).

A evapotranspiração, após a precipitação, é o maior componente do balanço hídrico terrestre por ser responsável por transferir a umidade da superfície da terra para atmosfera na forma de vapor (GHARBIA et al., 2018), pode ser aplicada em estudos meteorológicos e climatológicos (CARVALHO et al., 2011). A estimativa desta é crucial para compreender o balanço hídrico e, desenvolver planos de recursos hídricos de forma eficaz, permitindo informações que sejam identificadas condições que podem fragilizar a produção agrícola como irregularidades de chuvas, problemas de seca e excedente hídrico (PARK; CHOI, 2015).

Dentre os modelos de estimativa de evapotranspiração citados na literatura científica, cabe destacar o de Penman-Monteith por ser amplamente empregado (LANG, et al., 2017; LIMA, 2016; NETO, 2016), e divulgado como padrão para cálculo dos valores diários de Evapotranspiração de referência pela Food And Agriculture Organization (FAO) das Nações Unidas. A estimativa de Penman-Monteith FAO-56 utiliza variáveis meteorológicas, como: temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa em escalas temporais distintas (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015). Por outro lado, trata-se de uma limitação do modelo devido a necessidade de medições de todas variáveis meteorológicas (BRIXNER; SCHÖFFEL; TONIETTO, 2014). Cabe ressaltar as melhorias da estimativa do método na literatura (ALLEN et al., 1998; CARVALHO et al., 2011; LIMA, 2008), como a utilização de modelos numéricos de múltiplas estimativas de evapotranspiração que fazem uso de softwares, por exemplo, o REF-ET, é comum (ALMEIDA et al., 2019; PARK; CHOI, 2015).

O estado de Minas Gerais (MG) contém 19.597.330 habitantes sendo classificado como o segundo mais populoso do país e o quarto maior em extensão territorial (586.521,235 km² de área) (IBGE, 2019); do produto interno bruto (PIB) cerca de 1/3 depende do setor agrícola (MARTINS et al., 2018). Além disso, é o segundo estado brasileiro com maior número de

estabelecimentos rurais enquadrados como familiares (FORTINI; SILVEIRA; MOREIRA, 2016), demonstrando que a histórica importância do setor agrícola ainda se faz presente na geração de renda da sociedade mineira.

O quadrante Noroeste e Nordeste de MG depende fortemente da agricultura familiar (MINAS GERAIS, 2014) e está se tornando cada vez mais vulnerável por compreender locais onde, de acordo com o Índice Integrado de Seca (IIS), têm-se intensificado as condições de seca (CEMADEM, 2019). Ademais, a ocupação da área por populações com economias pouco desenvolvidas e dependentes das atividades agrárias podem limitar a capacidade das populações frente às necessidades de adaptação as possíveis mudanças climáticas, colocando a região em situação de vulnerabilidade (FREITAS; CALHEIROS; REIS, 2019). Estudos que avaliem as anomalias climatológicas da evapotranspiração na região do quadrante Noroeste e Nordeste de MG são escassos, apesar de possibilitarem a adoção de estratégias eficazes para mitigar, ao identificar áreas que merecem atenção por parte das políticas públicas, os efeitos da seca e consequentes déficits hídricos que afetam a produção agrícola e as populações dependentes deste sistema produtivo (ANJOS, 2017).

Nesse ensejo, o presente estudo estimou as anomalias referentes à evapotranspiração, a partir da série histórica do quadrante NE e NW do Estado de Minas no período de 2009 a 2018 em comparação com as normais climatológicas (1981-2010) e, foi feita uma espacialização com os dados de anomalias de evapotranspiração encontrados. Por fim, frente às atuais limitações, do ponto de vista operacional e financeiro, das medidas de evapotranspiração fornecidas pelas Estações Meteorológicas, causando buracos nas séries históricas dos dados de evapotranspiração para o período de 2009 a 2018, viu-se a necessidade de preenchimento por meio da substituição de anomalias de evapotranspiração com dados obtidos *in situ* por anomalias de evapotranspiração alcançadas com dados de assimilação e foi feita uma verificação da viabilidade dessa substituição através de análises estatísticas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Elementos Meteorológicos

O tempo meteorológico pode ser definido como estado instantâneo da atmosfera. Entende-se como estado da atmosfera o conjunto de atributos que a caracterizam em determinado momento, os chamados elementos meteorológicos. Os principais elementos são: temperatura, umidade, chuva, nebulosidade, pressão atmosférica, etc (VIANELLO; ALVES, 2000). A Meteorologia se encarrega do estudo do tempo que por variar muito devido à complexidade da atmosfera, dificulta sua previsão com antecedência de mais de quatro ou cinco dias mesmo para os melhores meteorologistas. (JORDAN; GROTZINGER; ABREU, 2006)

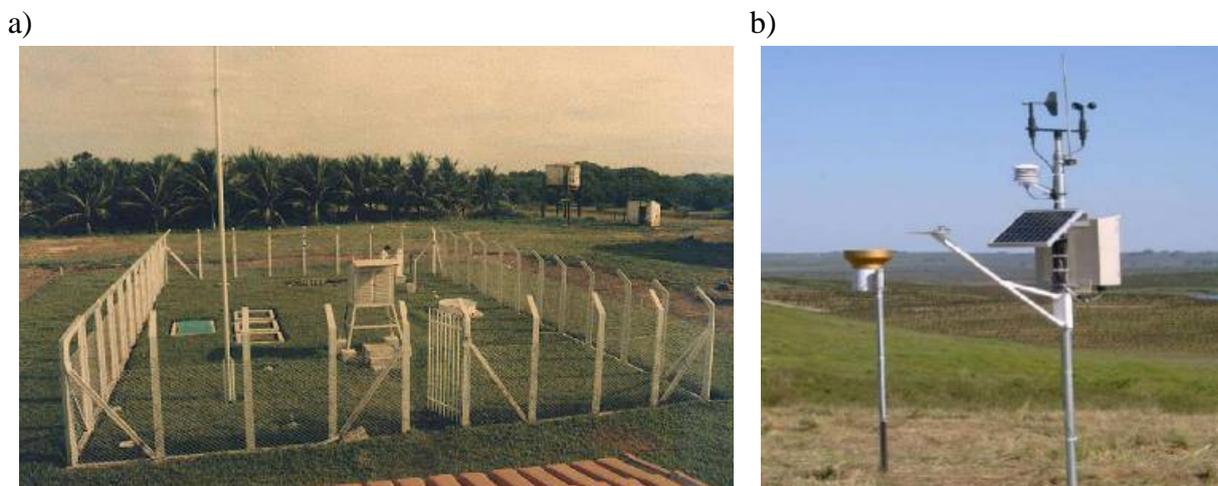
Segundo Vianello (2000), o clima é definido como a integral das condições do tempo meteorológico em uma determinada área e período. Este pode ser definido também de acordo com INMET (2020), como estudo médio do tempo para certa localidade e determinado período ou mês. A climatologia é a ciência que estuda o clima e utiliza os dados básicos da meteorologia com intuito de descobrir o comportamento médio da atmosfera para um determinado período, através de métodos estatísticos (VIANELLO; ALVES, 2000)(INMET, 2020). Quando os valores médios calculados são para um período relativamente longo e uniforme compreendendo no mínimo três décadas consecutivas, obtêm-se as normais climatológicas. (DAVIDSON et al., 1989)

Os elementos meteorológicos são medidos, registrados ou determinados pelas observações meteorológicas que são base para estudos climáticos e para caracterizar o clima de determinado local (DINIZ; RAMOS; REBELLO, 2018). Estas observações são realizadas nas Estações Meteorológicas (Figura 1), local onde são utilizados diferentes tipos de instrumentos que as realizam e fornecem relatórios sobre o estado do tempo (CPTEC,2020). A Organização Meteorológica Mundial (OMM), determinou condições padrão para as observações de superfície que inclui: tipos de equipamentos usados, técnicas de calibração, ajustes, aferição, manuseio e procedimentos observacionais. Tal padronização torna viável à representatividade espacial e temporal do estado instantâneo da atmosfera e a capacidade de comparar os elementos meteorológicos (VIANELLO; ALVES, 2000).

As estações meteorológicas podem ser divididas em dois tipos, convencional ou automática. As convencionais (Figura 1) são compostas por vários sensores isolados que registram os elementos meteorológicos, tais como, pressão atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e direção da velocidade do vento, etc. Sendo que um técnico treinado realiza a leitura dos instrumentos de medida, pelo menos três vezes ao dia, em horários padrão definidos pela OMM (00, 06, 12 ou 18 UTM). Já, a estação meteorológica automática(Figura 2), é composta por uma unidade de medição central (“*data logger*”), ligada a vários sensores automáticos que medem parâmetros meteorológicos, tais como pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar e direção e velocidade do vento, ao integrar os valores observados minuto a minuto, os disponibiliza automaticamente a cada hora (YURI et al., 2017). Mediante o avanço tecnológico, fornecido pela automação de dados meteorológicos nas Estações Automáticas e, a dificuldade de manter redes mais densas de estações pelos custos de mão de obra envolvida, as Estações Convencionais vêm sendo substituídas por Estações Automáticas. Entretanto, em função da ação do tempo de uso, podem gerar dados imprecisos ou, até mesmo, interrupção na série de

dados, por estarem sujeitas a danos físicos causados por oxidação dos cabos, interferência no sinal, desconexão, dentre outros (STRASSBURGER et al., 2011).

Figura 1- Modelo de Estação Meteorológica Convencional (a) e Automática (b)



Fonte: Vianello (2011) e Souza (2018)

O Brasil conta atualmente com uma série de redes de estações meteorológicas, vale ressaltar o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por representar o Brasil junto à OMM. Além disso, o INMET é responsável pelo tráfego das mensagens coletadas pela rede de observação meteorológica da América do Sul, dos demais centros que compõem o Sistema de Vigilância Meteorológica Mundial e contam com mais de 400 estações (INMET,2020).

As observações meteorológicas começaram a ser realizadas de forma sistemática a partir de 1910. As primeiras normais climatológicas foram publicadas pelo Escritório de Meteorológica do Ministério da Agricultura, em 1970, e correspondiam ao período de 1931-1960. Em 1992, o Departamento nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, atual INMET, publicou as normais para o período de 1961-1990. No centenário da instituição, em 2009, seguindo os procedimentos de cálculo da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para um conjunto de 411 estações meteorológicas, foi concluído o projeto que realizou a ampliação e a revisão das normais climatológicas 1961-1990 computadas em 1992 pelo INMET. Seguindo o período estabelecido pela OMM, as normais climatológicas foram atualizadas de 1961-1990 para 1981-2010 (DINIZ; RAMOS; REBELLO, 2018).

Segundo a OMM, as informações referentes à clima são mais úteis se comparadas com uma referência, o que demonstra a importância do cálculo e divulgação das normais climatológicas. Por isso, através de comparações entre as Normais Climatológicas, publicadas pelo INMET dos períodos de 1931-1960, 1961-1990 com as normais Climatológicas 1981-2010 é possível verificar mudanças nos padrões climáticos locais. O conhecimento das normais

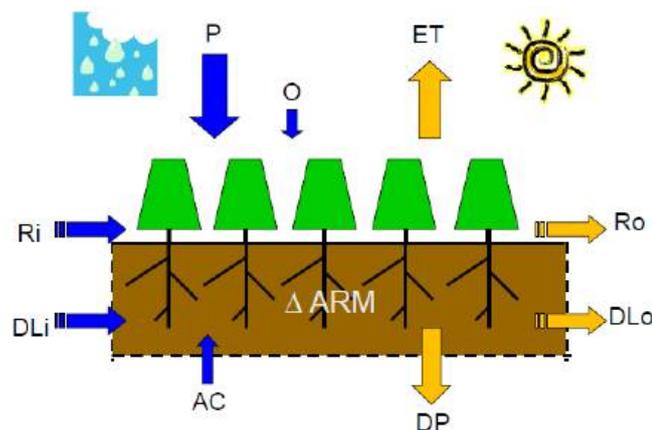
climatológicas pode também, por exemplo, ser aplicado para verificar as anomalias ou desvios de um elemento meteorológico. Segundo Diniz, Ramos e Rebello (2018), as anomalias são a diferença entre o valor observado e a normal climatológica correspondente.

Atualmente, é possível verificar o aumento da frequência de eventos climáticos extremos e os impactos causados diretamente na sociedade afetada pelos desastres naturais a eles associados, decorrentes do tipo de clima, configuração topográfica e da ocupação urbana estabelecida (IPCC, 2014). Esses eventos podem estar relacionados a estudos das anomalias nos elementos meteorológicos, vista que, ao analisar os desvios destes elementos pode-se estabelecer um padrão que venha representar um estado normal do seu comportamento. Algumas destas anomalias se comportam em ciclos anômalos, e outros longos ou curtos de períodos mais contínuos, podendo causar eventos extremos e caracterizar desastres naturais como inundações, enchentes, ondas de calor, estiagens, geadas, granizos, movimentos de massa, queda de energia e construções (DINIZ; RAMOS; REBELLO, 2018).

2.2. Balanço Hídrico Climatológico

O Balanço Hídrico baseia-se no princípio de conservação de massa, sendo este à contabilização das entradas e saídas de água em um volume de solo, num dado intervalo de tempo. Em escala macro, é o próprio “ciclo hidrológico” fornecendo, assim, informações a respeito da água disponível na biosfera, ou seja, no solo, rios, lagos, vegetação úmida e oceanos. As possíveis entradas incluem precipitação (P), orvalho (O), escoamento superficial (Ri), escoamento subsuperficial (DLi) e ascensão capilar (AC) enquanto as possíveis saídas no sistema são evapotranspiração (ET), escoamento superficial (Ro), escoamento subsuperficial (DLo) e drenagem profunda (DP) (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012). Genericamente, o Balanço Hídrico pode ser representado pela Figura 2:

Figura 2- Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico



Fonte: Sentelhas (2012)

Assim, a variação de armazenamento de água no solo pode ser obtida através das entradas e saídas de água do sistema, representada pela seguinte equação:

$$\Delta ARM = P + O + Ri + DLi + AC - ET - Ro - DLo - DP \quad \text{Equação 1.}$$

De todas as entradas, apenas precipitação e orvalho dependem do clima da região, as demais dependem do relevo, tipo, cobertura do solo e vegetação. A precipitação é o principal componente de entrada do ciclo hidrológico, tendo em vista que a contribuição do orvalho e da ascensão capilar pode ser considerada desprezível. A primeira por ser relevante apenas em regiões muito áridas e a segunda por ter uma contribuição pequena e ocorrer apenas em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos. Pode-se admitir também que os fluxos horizontais de água (R_i , R_o , DLi e DLo), para áreas homogêneas, sejam nulos, por se compensarem entre os períodos de déficit hídrico e de chuvas. A evapotranspiração é a principal saída de água do balanço hídrico, de forma que a drenagem profunda expressa apenas o excesso de água que penetrou no volume de controle nos períodos chuvosos (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012). Feitas as considerações mencionadas obtém-se a equação geral do balanço hídrico (Equação 2):

$$\Delta ARM = P - ET - DP \quad \text{Equação 2.}$$

Dos métodos mais utilizados para cálculo do Balanço Hídrico, destaca-se o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1995), que considera, portanto, para cálculo do balanço a precipitação (P) como variável de entrada da água no sistema (solo); a evapotranspiração (ET) potencial como sendo a saída de água do sistema pelas plantas e o armazenamento máximo no solo (capacidade de água disponível-CAD)(CARVALHO, 2016).

. O método também foi elaborado para determinar o regime de chuvas de um determinado local, sem precisar de medidas diretas das condições do solo, por isso, utiliza-se a evapotranspiração real (LOUZADA, 2016). A partir dessas variáveis torna-se possível estimar a variação do armazenamento, agora denominada de alteração do armazenamento (ALT), o excedente hídrico (EXC) antes chamado de drenagem profunda e a evapotranspiração real (ETR), dando origem a seguinte equação:

$$\pm ALT = P - ETR - EXC \quad \text{Equação 3.}$$

A determinação de ETP e ETR no modelo permite estimar, além de ALT e de EXC, o déficit hídrico (DEF) tornando possível definir não apenas os períodos de excedentes como os de deficiência hídrica. Conforme trabalho de Passos et al. 2016, que estimou o DEF para o município de Chapadinha/MA. O déficit hídrico é definido da seguinte forma (Equação 4.):

$$\text{DEF} = \text{ETP} - \text{ETR} \quad \text{Equação 4.}$$

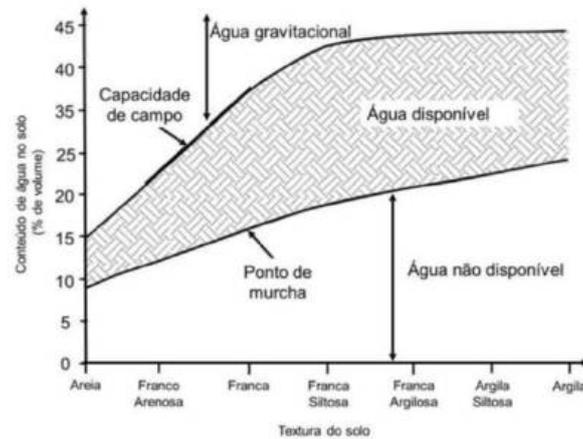
O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1995), possibilita monitorar a variação do armazenamento de água no solo, e pode ser utilizado também para gerenciamento dos recursos hídricos e planejamento estratégico agrícola (PASSOS; ZAMBRZYCKI; PEREIRA, 2017).

O BHC quando calculado mediante dados médios de P e ETP é denominado de Balanço Hídrico Climatológico Normal e para sua elaboração é utilizada os valores das normais climatológicas (MARTINS, 2019). Este tipo de balanço hídrico é um indicador climático da disponibilidade hídrica da região, por meio da variação das condições do BH dos períodos com deficiências e excedentes hídricos (MACHADO et al., 2012). Como as informações por ele fornecidas são de cunho climático, estas auxiliam o planejamento estratégico agrícola ao subsidiar a determinação da melhor época e manejo para a exploração agrícola. (PASSOS; ZAMBRZYCKI; PEREIRA, 2017)(MARTINS, 2019)

A metodologia pode também ser aplicada quando é necessário fazer o acompanhamento da disponibilidade hídrica regional, não utilizando valores normais, mas calculando-se o balanço em uma sequência de períodos (dias, semanas, meses), o balanço hídrico nessa situação é chamado de sequencial (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

No balanço hídrico, segundo Thornthwaite & Mather (1955), a capacidade de campo e a taxa de utilização da umidade do solo para a evapotranspiração passaram a depender da profundidade, do tipo e da estrutura do solo, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3. Relação entre a capacidade de água disponível (CAD) e a textura do solo.



Fonte: Adaptado de Brady (1990).

Dependendo do tipo de solo, a profundidade pode variar entre 300 mm, em solos siltosos profundos, a poucos milímetros em solos arenosos rasos. Entretanto, em solos argilosos e siltosos, as plantas podem possuir raízes menos profundas que nos solos argilosos, podendo haver alguma compensação (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012). Por isso, a seleção da CAD é o primeiro passo para elaboração do BHC, seja ele sequencial ou normal, representa o máximo de água disponível que determinado tipo de solo pode reter em função da exploração efetiva das raízes (P_e), da profundidade do solo e de suas características físicas como, capacidade de campo (CC), densidade aparente ou global (D_a), e ponto de murcha permanente (PMP), portanto:

$$CAD = \frac{CC - PMP}{100} * D_a * P \quad \text{Equação 5.}$$

Ao utilizar o balanço hídrico climatológico para fins climatológicos, ou seja, de caracterização da disponibilidade hídrica de uma região, o CAD é comumente adotado com valores variando de 75 a 125 mm (PASSOS; ZAMBRZYCKI; PEREIRA, 2016; SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012; SOUZA et al., 2013)

2.2. Evapotranspiração

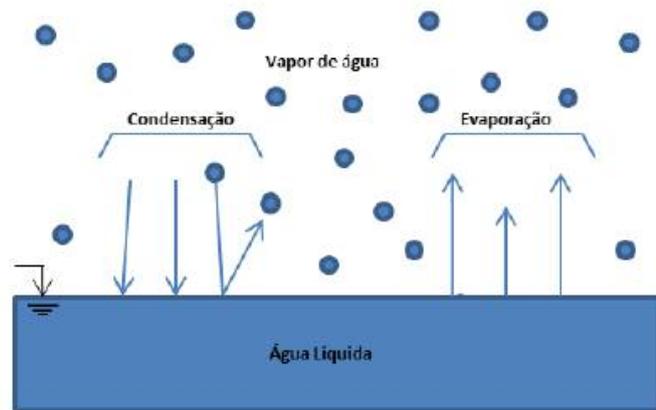
A evaporação é o termo usado, na meteorologia, para se referir ao processo físico de mudança de fase da água do estado líquido para o gasoso (vaporização), presente em rios, lagos, oceanos, no solo, e na vegetação úmida (interceptação da chuva e evaporação do orvalho) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Para que esse processo ocorra há a necessidade de energia e uma diferença de potencial entre a superfície e a atmosfera. A energia proveniente da radiação solar e, em menor grau da temperatura ambiente do ar, é necessária para ocorrer à passagem de água à fase gasosa como resultado do aumento a energia cinética

das moléculas. Ou seja, o saldo de radiação (R_n) é repartido em calor sensível (H) transmitido para o ar e solo, que se refere a porção de ondas longas irradiadas pela superfície terrestre, responsável pela mudança de temperatura e, em calor latente (LE) parcela de energia requerida para transformar a água líquida em vapor d'água(KICH, 2018).

É importante ressaltar que a temperatura do ar varia de acordo com fatores macroclimáticos, fatores topográficos e fatores microclimáticos. Os fatores macroclimáticos estão relacionados à altitude, latitude, massas de ar, correntes oceânicas, oceanidade/continentalidade e frentes. Já os fatores topográficos estão relacionados ao relevo, ou seja, à configuração e exposição do solo. Por último, os fatores microclimáticos, que estão relacionados à cobertura do terreno(SENTELHAS; ANGELOCCI, 2012)

A taxa líquida da evaporação é explicada pela diferença entre a taxa a remoção do vapor de água da superfície (vaporização) e a taxa em que as moléculas contidas no ar retornam aos corpos hídricos (condensação) (Figura 3).

Figura 4. Equilíbrio da troca de moléculas de água entre uma superfície de água e o ar



Fonte: Kich (2018)

De forma que, à medida que a evaporação acontece, o ar circundante começa a ficar gradualmente saturado, ou seja a taxa de moléculas de água que deixam uma superfície líquida para o ar se torna a mesma que a taxa de retorno de moléculas de vapor d'água do ar para a superfície líquida. Por isso, o processo desacelera até cessar, momento onde não há mais déficit da pressão de vapor. O processo de evaporação continua enquanto houver substituição do ar saturado por um ar mais seco. O vento remove o vapor d'água produzido, substituindo o ar saturado por ar mais seco, essa difusão vertical aumenta em função de sua velocidade (KICH, 2018). Outro aspecto a ser considerado são as turbulências, que aceleram a difusão vertical do vapor d'água gerado na interface superfície/atmosfera e, aumentando de acordo com a velocidade do vento(VAREJÃO-SILVA, 2006). Dessa forma, devem ser considerados na

análise do processo de evaporação os seguintes elementos meteorológicos: radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento.

Quando ocorre a vaporização da água contida nos tecidos das plantas e, que fazia parte de seu metabolismo sendo transferida para a atmosfera, tem-se à chamada de transpiração, um processo resultante da atividade fisiológica da vegetação. A vaporização acontece predominantemente dentro da folha, a partir das paredes celulares em direção aos espaços intercelulares de ar, onde a troca de vapor com a atmosfera é controlada pela abertura dos estômatos. Por consequência, ao avaliar a taxa de transpiração, assim como na evaporação, elementos como radiação, temperatura do ar, umidade do ar e vento devem ser considerados (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A evapotranspiração é a combinação desses dois processos separados de transferência de água para a atmosfera, ou seja, por um lado, a evaporação da umidade do solo ou água e, por outro, da transpiração das plantas por serem simultâneos e a forma de distinção entre eles ser difícil (ALLEN et al., 1991; VAREJÃO-SILVA, 2006).

As mesmas unidades da precipitação são utilizadas para evaporação e evapotranspiração, com base na altura da lâmina de água, em milímetros, de forma que um milímetro equivale a transferência para atmosfera de um litro de água para cada metro quadrado da projeção horizontal da superfície (VAREJÃO-SILVA, 2006). A literatura estabelece quatro conceitos para evapotranspiração: a real, de referência e de cultura que se diferenciam dependendo de fatores como o tipo de vegetação, o tamanho da área coberta com vegetação e do suprimento de água pelo solo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

2.2.1. Evapotranspiração Real

A perda de água por evaporação e transpiração em uma dada parcela de solo cultivado que depende das condições meteorológicas reinantes, da atividade biológica da vegetação presente e, ainda, da umidade de um solo com ou sem restrição hídrica é chamada de evapotranspiração real (FERNANDES, 2010).

2.2.2. Evapotranspiração de Referência

A taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência é chamada de evapotranspiração de referência (ET_0). Com objetivo de estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente das práticas de manejo, tipo de cultura e desenvolvimento, o conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido (ALLEN et al., 1998). No contexto, a cultura de referência é a vegetação rasteira “grama”, e essa cultura não apresenta estresse hídrico, tem uma altura de 0,08 a 0,15 metros, em crescimento ativo, com o solo completamente coberto e um albedo de 0,23 (FERNANDES, 2010).

2.2.3. Evapotranspiração de Cultura

A evapotranspiração de cultura (ET_c) é a transferência de vapor de água para a atmosfera por uma cultura isenta de restrições hídricas, em qualquer fase de seu desenvolvimento, seja no plantio/semeadura até a colheita, em uma área de um ou mais hectares. A ET_c pode ser obtida a partir pela ETP através da relação (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007):

$$ET_c = K_c * ETP \quad \text{Equação 6.}$$

Em que, K_c é o coeficiente de cultura é determinado empiricamente e varia com a cultura, seu estágio de desenvolvimento, com o clima e com as práticas agronômicas adotadas.

Segundo Carvalho et al. (2011) a diversidade de métodos para estimar a evapotranspiração de referência ocorre em função da simplicidade de uso de algumas metodologias, da necessidade de adequação do método às condições climáticas da região e limitação de elementos meteorológicos ou climáticos que alimentam estes métodos. Meireles (2007) afirma ainda que por apresentarem um caráter empírico, os métodos têm precisão variável, de forma que, como alguns subestimam e outros superestimam as estimativas de evapotranspiração tornam-se necessárias calibrações e validações para alcançar uma maior confiabilidade.

Os métodos teóricos e empíricos de estimativa de evapotranspiração de referência mais comuns são: Penman(PEN); Thornthwaite (TW); Turc (TC); Penman-Monteith-FAO (PM-FAO); Tanque Classe A (TCA); Blaney-Criddle (BC); Makkink (MK); Hamon (HM); Radiação Solar(RS); Linacre (LN); Camargo(CAM); Jensen-Haise (JH); Hargreaves (HG); Priestley-Taylor (PT); Holdridge (HD); Kharrufa (KF); ASCE- Penman-Monteith (ASCE-PM); Penman Modificado (PEN-MOD) (CARVALHO et al., 2011).

O método de Penman Monteith é o recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO) para estimar a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). O método FAO-PM é um método fisiológico e aerodinâmico, que requer dados meteorológicos de entrada, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento (PARK; CHOI, 2015). A existência de métodos diversos para estimativa de evapotranspiração de referência, apesar da publicação do boletim 56 da FAO ter recomendado o método Penman-Monteith como padrão, é justificada pela dificuldade de obtenção dos dados meteorológicos de entrada para o cálculo devido à ocorrência de poucas estações meteorológicas (LIMA, 2016). A expressão matemática do modelo de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998), é dada pela Equação 7 em que:

$$ET_0 = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{(T + 273)} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad \text{Equação 7.}$$

ET_0 – evapotranspiração de referência, mm.d⁻¹;

Δ – declinação da curva de pressão de saturação, kPa°C⁻¹;

R_n – saldo de radiação a superfície, MJ.m⁻².dia⁻¹;

G – fluxo de calor no solo, MJ.m⁻².dia⁻¹;

γ – constante psicrométrica do ar, kPa°C⁻¹;

T – temperatura média do ar a 2,00 m de altura, °C;

u_2 – velocidade do vento a 2,00 m de altura, m.s⁻¹;

e_s – pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a – pressão de vapor atual do ar, kPa.

Devido à complexidade para cálculo de ET_0 , recursos computacionais podem ser utilizados como alternativa para o desenvolvimento de softwares que auxiliam nesta tarefa. Desse modo, o Reference Evapotranspiration Calculator (REF-ET) foi desenvolvido pela Universidade de Idaho fornecendo cálculos padronizados de evapotranspiração de referência baseados nos dados disponibilizados pelo usuário de medições de dados meteorológicos conseguindo, dessa forma, obter ET_0 para o modelo Penman-Monteith e mais outros 14 métodos e equações.

2.3. Métodos de Interpolação Espacial

A taxa da evapotranspiração é afetada pela heterogeneidade espacial e temporal, pelo nível de cobertura do solo, vegetação, assim como, pelas diferenças de energia e água disponíveis (KHALIL; ESSA; WAHAB, 2015). Além da variabilidade espacial natural da ET, alterações antropogênicas provocadas pelo desmatamento produzem um aumento da área de solo exposto, principalmente em áreas de clima árido e semiárido contribuindo, dessa forma, para o aumento da heterogeneidade (MAUSER; SCHÄDLICH, 1998). Para o planejamento de irrigação, modelagem ambiental e hidrológica, dentre outras aplicações práticas dos dados de evapotranspiração, são exigidos, em sua maioria, que estes sejam avaliados de forma distribuída espacialmente, por isso, verifica-se uma necessidade da elaboração de mapas de evapotranspiração (RICARDO; VILANOVA; TRANNIN, 2012). Por isso, além de estudos baseados em medições pontuais para estimativa da evapotranspiração é necessária uma

avaliação espacial da mesma que pode ser feita a partir de métodos de interpolação espacial (CARVALHO, 2016).

O uso de interpoladores ou estimativa reproduzem as características da variável com base em pontos amostrais, transformando dados discretos em contínuos (DA CASTRO et al., 2010). De acordo com Burrough (1986) espacialmente, a interpolação é o procedimento que estima valores de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos. Por isso, ao utilizar métodos de interpolação para a variável ETo, assim como para diferentes variáveis, é possível também encontrar sua estimativa em locais onde não existem estação meteorológica instalada. Os métodos de interpolação para dados georreferenciados podem ser classificados em estocásticos/geoestatísticos e determinísticos. Os métodos estocásticos fornecem tanto estimativas (parte determinística) quanto os erros associados incorporando o conceito de aleatoriedade. Os métodos determinísticos, no entanto, não fornecem uma avaliação dos valores previstos em relação aos erros associados. Dentre os diversos algoritmos e técnicas usadas no processo de interpolação tem-se o Inverso da Distância Ponderada (ANJOS, 2017).

O inverso da Distância ponderada (IDP) é considerado o método mais simples de interpolação, é um modelo determinístico de efeito local, que utiliza o pressuposto de que valores mais próximos são mais semelhantes do que os que estão mais distantes (SIKORA, 2019). Para qualquer local não medido, o IDW irá prever um valor a partir de valores amostrados próximos ao local de predição. Os valores mais próximos terão maior influência, por isso, maior peso, do que aqueles mais distantes. Dessa forma, o IDW considera que cada ponto medido tem uma influência de localização que diminui com a medida que distância aumenta (HODAM et al., 2017). O cálculo do IDW é dado pela seguinte fórmula (SIKORA, 2019):

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(s_i) \quad \text{Equação 8.}$$

Em que, s_0 é o valor a ser predito para a localização; n é o número de pontos medidos ao redor do local de predição, λ_i são os pesos atribuídos para cada ponto observado que será utilizado e $Z(s_i)$ será o valor observado no local (s_i) .

Os pesos do local s_i podem ser determinados pela equação:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p} \sum_{i=1}^N \lambda_i} = 1$$

Equação 9.

Em que d_{i0} é a distância entre o local de predição (s_0) e cada um dos locais medidos (s_i) e na medida que a distância aumenta o peso é reduzido por um parâmetro “p”. A escolha de tal parâmetro é feita de forma arbitrária mas é largamente utilizado com $p=2$, onde haverá uma forte influência para pontos mais próximos e uma leve influência para pontos mais distantes, fazendo com que o método passe a ser chamado de Inverso do quadrado da distância (IQD) (GARDIMAN et al., 2012).

De acordo com Landim (2000) as principais vantagens do método IDP são o baixo custo computacional e a fidelidade aos valores amostrais originais, por não estimar valores menores ou maiores que os mínimos e máximos dos dados. Além disso, é útil na análise de anomalias e comparado a outros métodos como, por exemplo a Krigagem, o IDW é aplicável a conjuntos de dados de pequeno tamanho para os quais semivariogramas modelados são de difícil ajuste (TOMCZAK, 1998). No entanto, ressalta-se que o método não deve ser utilizado quando os dados estão distribuídos de forma esparsa (ALESSI, 2011; HODAM et al., 2017; JAKOB; YOUNG, 2006).

2.4. Dados de Assimilação

O Sensoriamento remoto é o termo usado para definir a tecnologia de obtenção de informações do ambiente terrestre através de dados coletados a distância por sensores, sem que haja contato com o alvo com objetivo de estudar processos, eventos e fenômenos que ocorrem na superfície do planeta. Os satélites são um exemplo de tecnologia utilizada no sensoriamento remoto onde os sensores a borda de suas plataformas orbitais registram o nível de radiação eletromagnética emitida e/ou refletida de um determinado local na superfície terrestre (VIEIRA, 2019). Por meio de dados radiométricos coletados e da análise das interações entre as substâncias componentes do planeta e as radiações eletromagnéticas, por meio de sensores por satélites orbitais, é possível obter informações sobre as propriedades da superfície terrestre e estimar a evapotranspiração tanto em escala regional como local. A estimativa da evapotranspiração com sensoriamento remoto pode ser feita pelo fluxo de calor latente como residual do balanço de energia à superfície (SILVA et al., 2007).

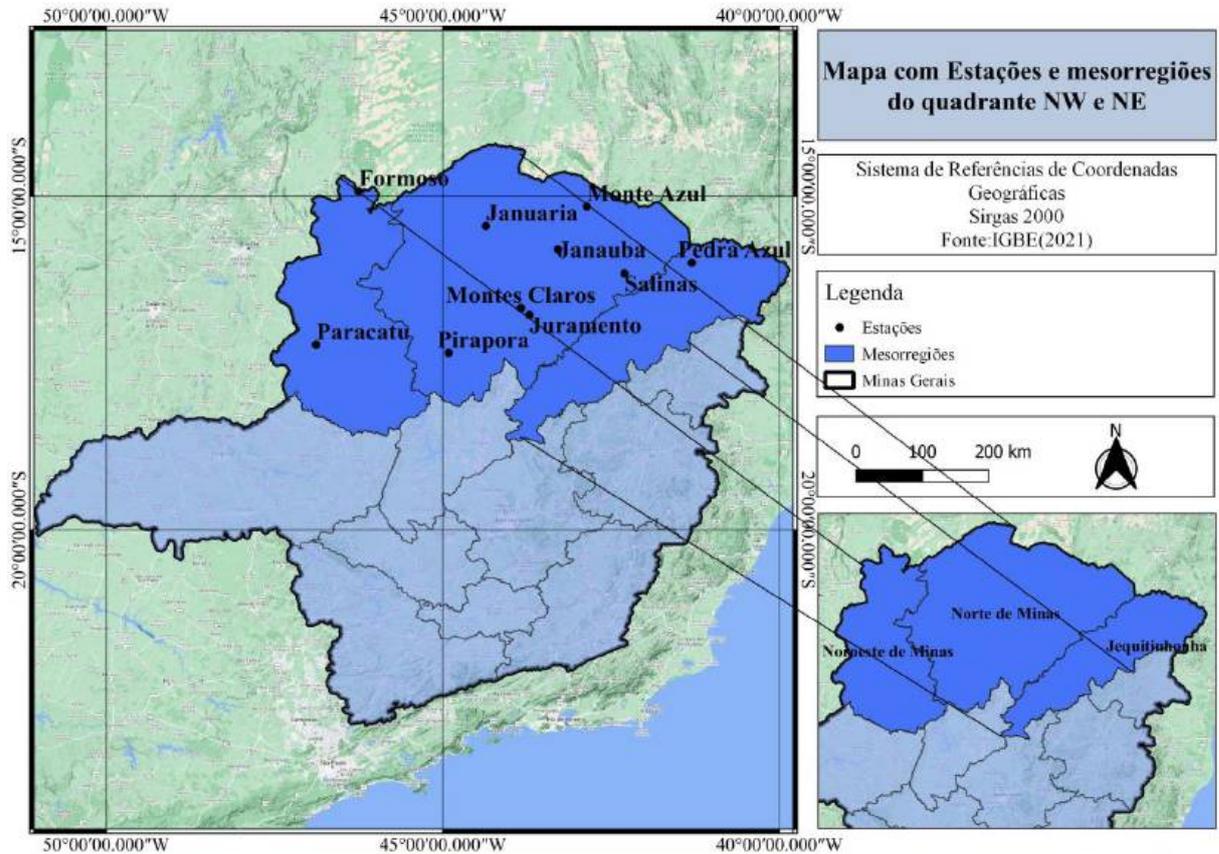
Complementarmente, dados obtidos por meio de satélite podem ser diretamente captados pelos sensores, como também podem ser combinados com informações observadas em estações meteorológicas e resultados de modelos climáticos. Esse procedimento de combinação é chamado de assimilação de dados e tem a função de melhorar a estimativa da atmosfera, diminuindo a incerteza de um determinado estado modelado, pois aumenta o uso de informações observadas (SIKORA, 2019). Um exemplo de projeto criado para melhorar as observações hidroclimáticas disponíveis é o Sistema de assimilação de dados terrestres (FLDAS) da Rede de Sistemas de Alerta antecipado contra a Fome (FEWS NET) (LDAS,2021).

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

O estudo teve como área geográfica de abrangência o chamado quadrante Noroeste e Nordeste de Minas Gerais que ocupam as mesorregiões Noroeste de Minas, Norte de Minas, Jequitinhonha e Vale do Mucuri, no Estado de Minas Gerais. Foram selecionadas 10 estações meteorológicas convencionais pertencentes à rede nacional de observações meteorológicas de superfície, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), presentes nos municípios de Formoso, Janaúba, Januária, Juramento, Monte Azul, Montes Claros, Paracatu, Pedra Azul, Pirapora e Salinas, distribuídas de acordo com a figura 5.

Figura 5- Distribuição espacial das Estações do INMET e as mesorregiões que abrangem o quadrante NE e NW do Estado de Minas Gerais.



Fonte: Da autora (2021)

Conforme demonstrado na Tabela 1, a região ocupa uma extensão territorial de 29.766,647 Km² (IBGE, 2018) e abriga uma população de 799.915 habitantes (IBGE, 2019). Dois tipos climáticos segundo Koppen caracterizam o quadrante noroeste/nordeste, o climas Aw, clima tropical de savana com estação seca no inverno e, clima BSh, clima semi árido (REBOITA et al., 2015).

Tabela 1- Caracterização do quadrante noroeste/ nordeste de Minas Gerais.

Estação	Mesorregião	Latitude	Longitude	Altitude	Área(Km ²)	Densidade Demográfica (hab/km ²)	Climatologia de Koppen	PIB	IDH
Formoso	Noroeste	-14,93	-46,25	840	3.704.380	2.22	Aw	21.306,62	0.640
Janaúba	Norte	-15,8	-43,29	516	2.181.319	30.63	BSh	15.761,25	0.696
Januária	Norte	-15,45	-44,36	473,71	6.661.588	9.83	BSh	10.162,62	0.658
Juramento	Norte	-16,78	-43,71	650	431.630	9.53	Aw	8.948,26	0.669
Monte Azul	Norte	-15,16	-42,86	625	1001,296	22.12	Aw	9.231,80	0.659
Montes Claros	Norte	-16,68	-43,84	652	3.568.941	101.41	Aw	23.323,68	0.770
Paracatu	Noroeste	-17,23	-46,88	712	8.229.587	10.29	Aw	46.629,49	0.744
Pedra Azul	Jequitinhonha	-16	-41,3	648,9	1.594.651	14.95	Aw	12.284,14	0.627
Pirapora	Norte	-17,35	-44,91	505,24	549.514	97.12	Aw	40.566,30	0.731
Salinas	Norte	-16,16	-42,3	471,32	1.862.117	20.75	Bsh	13.184,48	0.679

Fonte: IBGE (2021); Reboita (2015)

As regiões de Minas Gerais com classificação climática Aw apresentam a estação seca de maio a setembro, com uma precipitação inferior a 40 mm.mês⁻¹. Os meses de novembro a fevereiro apresentam os maiores valores de precipitação com uma média de 187 mm.mês⁻¹. Como esperado, mesorregião do estado que faz divisa com o estado da Bahia, apresentam clima BSh, caracterizados por uma distribuição irregular da precipitação, concentrada principalmente nos meses de novembro, dezembro e janeiro com uma média mensal de 146 mm.mês⁻¹, sendo a média anual total é de 755mm. A estação seca equivale ao período de maio a setembro apresenta uma precipitação média de menos de 10 mm.mês⁻¹(ARIONALDO JÚNIOR et al., 2012).

Convém ressaltar que, em 1963, foram reconhecidos pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) na mesorregião Norte de Minas, aspectos físicos e climáticos semelhantes ao semiárido nordestino passando a integrar o “Polígono das Secas”. Além disso, merece destaque as disparidades das mesorregiões Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Norte de Minas em relação às demais do estado. Conforme demonstrado na Tabela 1, tais

locais apresentam baixos indicadores socioeconômicos, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,616; 0,610; 0,625 ; respectivamente, valores inferiores a 0,731, a média do Estado e, além disso, está entre as menores participações no Produto Interno Bruto (PIB) de todo o Estado com 1%, 1%, 4%, respectivamente (BRASIL, 2013). A área em estudo, por sua vez, possui 351.764 agricultores familiares que somam um percentual de participação de 40,6% de todo o Estado (MINAS GERAIS, 2014).

Esses dados permitem inferir que em linhas gerais às mesorregiões são caracterizadas pela existência de agricultores familiares e economias pouco desenvolvidas, muitas vezes dependentes das atividades agrárias. Estas condições socioeconômicas podem limitar a capacidade das populações frente às necessidades de adaptação às possíveis mudanças climáticas ampliando a relevância do estudo das anomalias de evapotranspiração (FREITAS; CALHEIROS; REIS, 2019). Vale ressaltar também que locais com poucas condições de investimento em medidas mitigadoras frente às anomalias climatológicas, sem condições de migrar para áreas menos insalubres e, onde exista menor dependência de atividades agrária e infraestrutura, correm maior risco à saúde e pobreza (FREITAS; CALHEIROS; REIS, 2019).

3.2. Dados Meteorológicos

No presente estudo foram selecionadas 10 estações meteorológicas convencionais em que os dados utilizados para realização dessa pesquisa foram extraídos do banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 5).

Para a estimativa da evapotranspiração de referência, utilizaram-se dados diários das seguintes variáveis meteorológicas: temperatura máxima, insolação, temperatura média compensada, umidade relativa média, velocidade do vento média, precipitação, temperatura mínima, no período de 2009 a 2018. Foram removidas as falhas dos dados brutos com auxílio do RStudio versão 3.6.3 (R Core Team (2020)).

Para a obtenção dos valores de evapotranspiração de referência, foi utilizado o software REF-ET, desenvolvido pelo centro de Pesquisa e Extensão da Universidade de Idaho em Kimberly, EUA (REF-ET,2021). O programa requereu os dados tratados de entrada e informações a respeito da localização geográfica, elevação, altura do anemômetro e termômetro. Neste estudo, a altura do anemômetro de 10 m e a altura do termômetro de 2m foram usadas para cálculo (VIANELLO, 2011) Informações como elevação, altitude e latitude estão descritas na Tabela 1.

Os dados diários de saída do REF-ET com os valores de ET_0 foram somados para cada mês e, posteriormente, divididos pelos anos do período estudado (10 anos), além disso, utilizou-

se também as normais climatológicas do INMET para o período de 1981 a 2010 com objetivo de encontrar as anomalias de evapotranspiração.

As anomalias mencionadas no estudo consistem na diferença absoluta dos dados mensais de evapotranspiração dos períodos estudados, de 2009 a 2018, levando-se em consideração a normal climatológica referente a cada Estação Meteorológica para o período de 1981-2010, conforme demonstrado pela equação 10. Em que, x é a evapotranspiração (DINIZ; RAMOS; REBELLO, 2010):

$$Anomalia_x = x - normal \quad \text{Equação 10.}$$

3.2. Inverso da Distância Ponderada

Na tabela 1 estão descritas as localizações das estações meteorológicas em questão com suas respectivas coordenadas geográficas e os valores mensais encontrados de anomalias de evapotranspiração, obtidos anteriormente através do software R. A partir dos dados apresentados criou-se um arquivo dbase, contendo as informações X, Y e Z, em que X é a latitude da estação, Y a longitude da estação e Z o valor das anomalias mensais da evapotranspiração.

A interpolação foi realizada por meio do software Arcmap “Geostatistics Analyst” que é um componente do ArcGIS. Foi utilizada a ferramenta “Geostatistics wizard” que executa automaticamente a interpolação com o inverso da distância ponderada. Como produto final, obteve-se a interpolação valores de anomalias de evapotranspiração apenas para a mesorregião Norte de Minas.

3.3. Dados de Assimilação

Com intuito de tentar substituir dados de anomalias de evapotranspiração obtidos com dados *in situ*, para preenchimento de possíveis falhas na série de dados de evapotranspiração, utilizou-se os dados de assimilação Fldas/Noah disponibilizados gratuitamente na plataforma Giovanni que possui simulação forçada por uma combinação de dados de análise retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações versão 2 (MERRA-2) e Centro de Perigos climáticos Precipitação Infravermelha com dados de estação (CHIRPS). Os dados FLDAS foram obtidos no mesmo ponto geográfico das estações meteorológicas, conforme a Figura 4. Foram utilizados dados mensais de evapotranspiração total em $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, do satélite CHIRPS, para o período de 2009 a 2018. A simulação permite obter dados meteorológicos com resolução espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ e resolução temporal em escala mensal, a cobertura espacial dos dados é global (60S, 180W, 90N, 180E) e variam de janeiro de 1982 até o presente.

Os dados brutos foram tratados no R e, por fim, foi feita a diferença absoluta dos dados mensais de evapotranspiração dos períodos estudados, levando-se em consideração a normal

climatológica do período de 1981-2010 e o mais recente de 2009 a 2018, da mesma forma que o mencionado pela equação 10.

3.3.1. Análise Estatística

Por fim, foram utilizados índices estatísticos para validar e analisar o cálculo. Adotou-se o erro quadrático médio (RMSE) e viés (BIAS) para comparar as anomalias de evapotranspiração baseadas nos dados das estações meteorológicas com os dados encontrados através da Plataforma Giovanni NASA (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015)(RICARDO; VILANOVA; TRANNIN, 2012)(CARETO, 2017) calculados da seguinte forma:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad \text{Equação 10.}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad \text{Equação 11.}$$

Em que, x_i são as anomalias de evapotranspiração observadas nas medições *in situ*, y_i são as anomalias de evapotranspiração observadas pelos dados de assimilação e N é o período que ocorreu essas observações, equivalente a 10 anos

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Representatividade da Série Histórica

A Tabela 2 apresenta a porcentagem de cobertura de dados das estações meteorológicas do quadrante noroeste/nordeste de Minas Gerais com intuito de identificar os dados faltantes na série temporal. Mediante análise é possível afirmar que as Estações de Formoso, Pirapora e Pedra Azul possuem medições para todo período analisado, entretanto, com o tratamento dos dados brutos, o período de dados observado para as primeiras estações foram apenas até 2016 e, 2015 para a última estação mencionada. Cabe ressaltar também que as estações de Janaúba e Monte Azul, foram desativadas em 2016, fato que vem acontecendo ao longo do território brasileiro mediante à falta de técnicos e recursos financeiros para manter seus equipamentos (INMET, 1992). Das 10 estações, apenas 5 possuem a série histórica completa para todos os elementos meteorológicos até o ano de 2018.

Especificamente, para a estação de Monte Azul, há uma cobertura de dados inferior a 53% e, a estação Pedra Azul, os meses de junho a dezembro possuem uma cobertura inferior a 50%. A Estação de Formoso contém mais de 60% de dados mensais, entretanto, o mês de setembro não apresentou dados disponíveis. Além disso, pode-se observar que as áreas mais

desenvolvidas possuem menos falhas, como é o caso de Paracatu e Salinas e, que tem-se uma baixa densidade de estações, em vista que, uma área de 29.766,647 Km² (IBGE, 2018) possui apenas 10 estações meteorológicas e a OMM recomenda um espaço mínimo de 150 km entre as estações sinóticas(VIANELLO; ALVES, 2000), evidenciando a necessidade de investimentos na rede meteorológica do INMET.

Tabela 2- Porcentagem de cobertura de dados das estações meteorológicas do quadrante noroeste/nordeste de Minas Gerais da década de 2009 a 2018 contendo os elementos meteorológicos selecionados e suas respectivas coordenadas geográficas.

Estação	Latitude	Longitude	Período	Mês	%Cobertura de dados
Formoso	-14,93	-46,25	06/01/2009 a 07/03/2016	Janeiro	74,2
				Fevereiro	69,26
				Março	75,55
				Abril	69,9
				Maio	69,6
				Junho	70,47
				Julho	70
				Agosto	72
				Setembro	0
				Outubro	70
				Novembro	63,88
				Dezembro	70
Janaúba	-15,8	-43,29	08/01/2009 a 07/09/2015	Janeiro	67,74
				Fevereiro	69,5
				Março	61
				Abril	69,4
				Maio	69,04
				Junho	68
				Julho	65,8
				Agosto	68,4
				Setembro	62
				Outubro	52
				Novembro	59,7
				Dezembro	59,68
Januária	-15,45	-44,36	27/02/2009 a 31/12/2018	Janeiro	90
				Fevereiro	90,43
				Março	90
				Abril	90
				Maio	90,3
				Junho	98
				Julho	89,3
				Agosto	94,2
				Setembro	99,67
				Outubro	97,1
				Novembro	98,33
				Dezembro	100

(continua)

				Janeiro	86,69
				Fevereiro	87,28
				Março	84,64
				Abril	86,62
				Maio	79,61
Juramento	-16,78	-43,71	01/01/2009 a 31/12/2018	Junho	69,7
				Julho	77,1
				Agosto	87,1
				Setembro	89,3
				Outubro	86
				Novembro	79,7
				Dezembro	84,85
				Janeiro	50
				Fevereiro	49,82
				Março	49,18
				Abril	50,3
				Maio	50
Monte Azul	-15,16	-42,86	21/06/2009 a 31/12/2015	Junho	49,16
				Julho	54,52
				Agosto	54,52
				Setembro	56,52
				Outubro	57,98
				Novembro	56,71
				Dezembro	46,92
				Janeiro	70,32
				Fevereiro	70,67
				Março	71,43
				Abril	69,77
				Maio	70,32
Montes Claros	-16,68	-43,84	01/01/2019 a 28/12/2018	Junho	70,47
				Julho	66,78
				Agosto	61
				Setembro	60,67
				Outubro	69,97
				Novembro	65,67
				Dezembro	60,81

(continua)

				Janeiro	99,68
				Fevereiro	100
				Março	94,19
				Abril	99,33
				Maio	99,35
Paracatu	-17,23	-46,88	01/01/2019	Junho	100
			a	Julho	100
			31/12/2018	Agosto	99,35
				Setembro	100
				Outubro	91,94
				Novembro	99,67
				Dezembro	92,56
				Janeiro	60
				Fevereiro	59,93
				Março	54,19
				Abril	60,2
				Maio	60,33
Pedra Azul	-16	-41,3	01/01/2009	Junho	50
			a	Julho	50
			07/02/2015	Agosto	50
				Setembro	50
				Outubro	43,69
				Novembro	45,67
				Dezembro	49,84
				Janeiro	57,93
				Fevereiro	70,82
				Março	67,43
				Abril	71,72
				Maio	71,61
Pirapora	-17,35	-44,91	01/01/2009	Junho	71,38
			a	Julho	65,91
			14/11/2016	Agosto	65,8
				Setembro	71,96
				Outubro	66,78
				Novembro	57,86
				Dezembro	64,29

(continua)

				Janeiro	100
				Fevereiro	100
				Março	99,68
				Abril	100
				Maio	100
Salinas	-16,16	-42,3	01/01/2009	Junho	99,67
			a	Julho	100
			31/12/2018	Agosto	100
				Setembro	99,33
				Outubro	97,41
				Novembro	99,67
				Dezembro	99,68
(conclusão)					

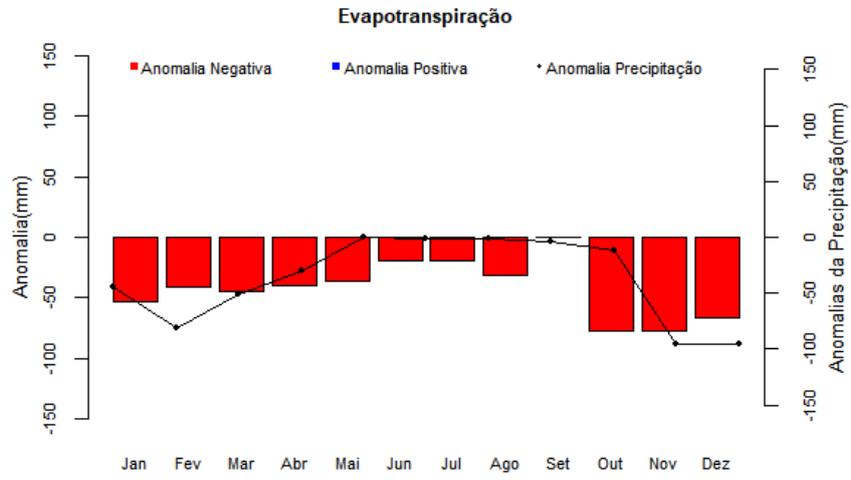
4.2. Anomalias mensais de Evapotranspiração

Os valores de anomalias de evapotranspiração, obtidos pela diferença entre os valores de evapotranspiração da década de 2009 a 2018 em relação a normais climatológicas (1981-2010), estão apresentados na Figura 6. Observa-se que a maioria das estações constataram anomalias negativas em todos os meses do ano exceto, Janaúria e Paracatu que se comportaram de forma semelhante, com anomalias positivas nos meses de inverno e final de outono (junho, julho, agosto e setembro). Os maiores valores de anomalias negativas de evapotranspiração observados foram no mês de outubro (primavera) para as Estações de Janaúba ($-132.9 \text{ mm. mês}^{-1}$) e Monte Azul ($-129.5 \text{ mm. mês}^{-1}$), enquanto os maiores valores de anomalias positivas encontram-se, no mês de agosto (inverno), para as estações de Paracatu ($27.2 \text{ mm. mês}^{-1}$) e Janaúria ($25.2 \text{ mm. mês}^{-1}$). Além disso, para todas as estações, os maiores valores de anomalias estão nos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera). Tais resultados corroboram com os resultados obtidos por Rosa et al. (2020), que observaram redução da evapotranspiração no fim de inverno/início de primavera e nos meses de verão (período chuvoso), o que pode indicar um déficit da precipitação no período de estudo e disponibilidade de água abaixo dos níveis normais. Além disso, a estação de Janaúba continua registrando os maiores valores de diminuição (DE ALMEIDA et al., 2020).

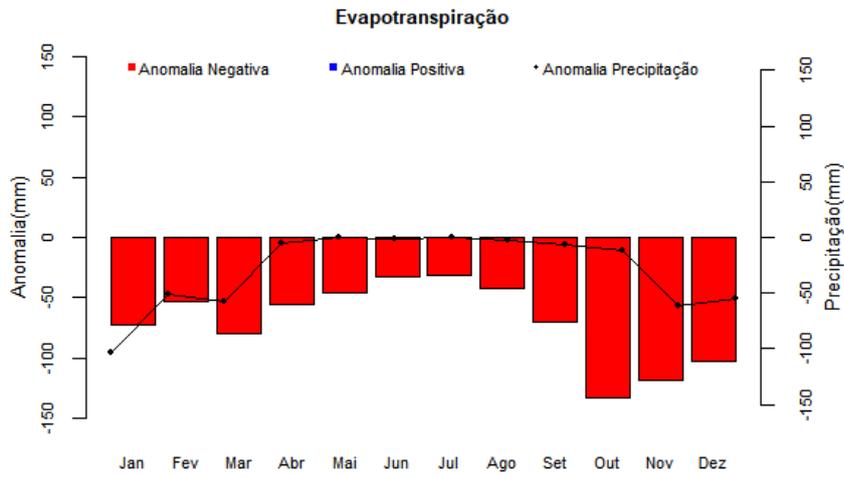
Analisando as anomalias de precipitação também apresentadas na Figura 5, podemos comprovar a teoria da relação entre a diminuição da evapotranspiração e a disponibilidade de água de chuvas ao verificar comportamento semelhante entre os dois elementos meteorológicos estudados e observar um predomínio dos valores negativos de anomalias de precipitação para todas as estações, exceto Juramento e, para a Estação de Paracatu apenas no mês de novembro.

Figura 6-Anomalias mensais de evapotranspiração (mm.mês-1) por estação no período de 10 anos

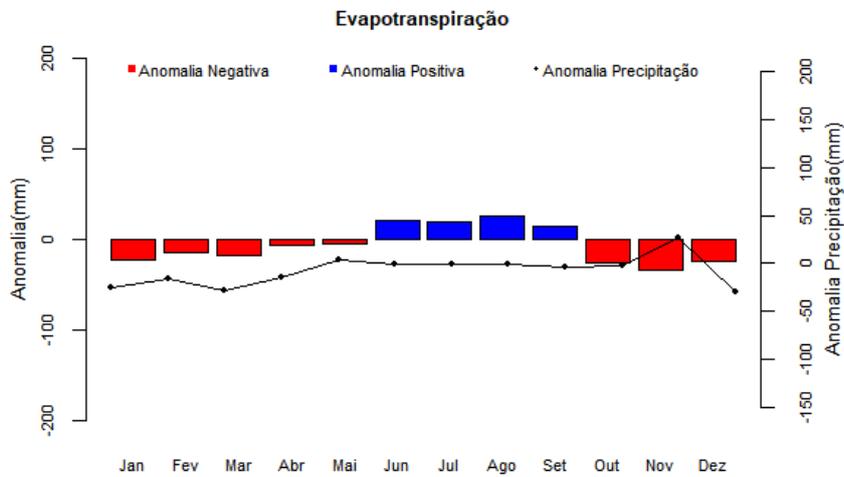
a. Formoso



b. Janaúba

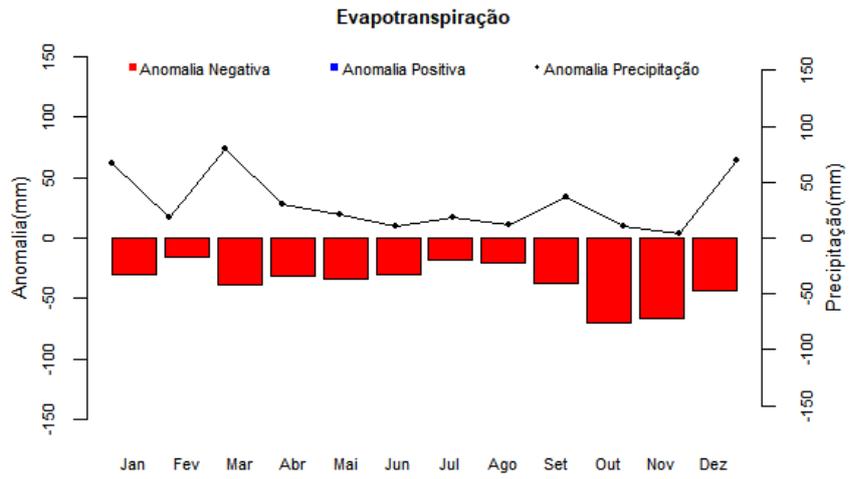


c. Januária

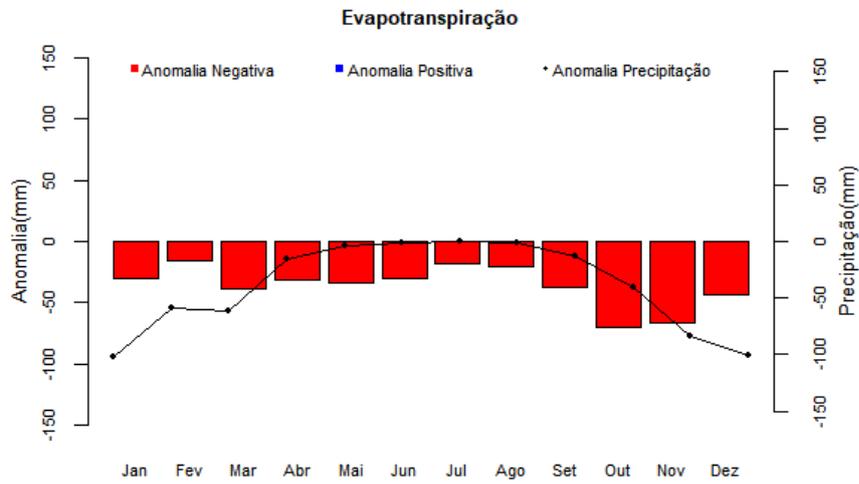


(continua)

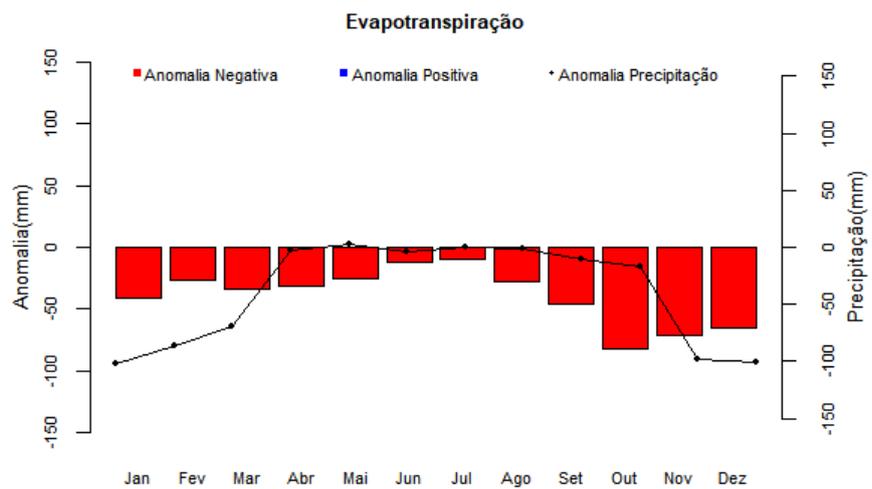
d. Juramento



e. Monte Azul

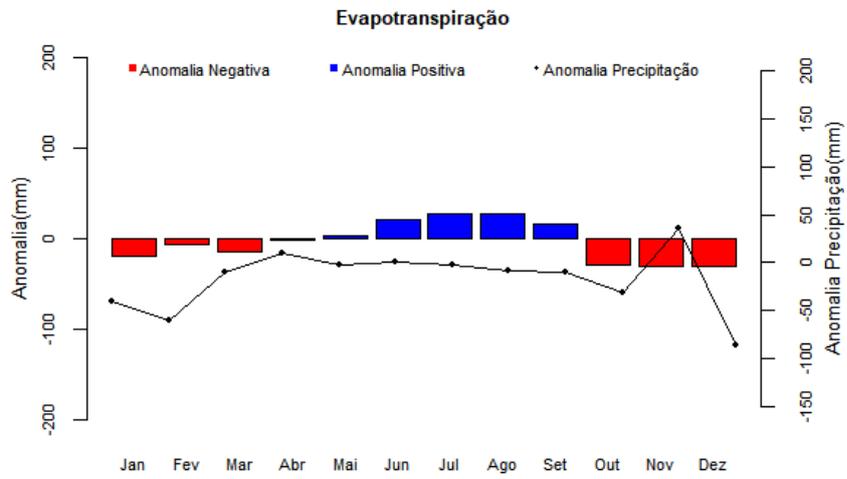


f. Montes Claros

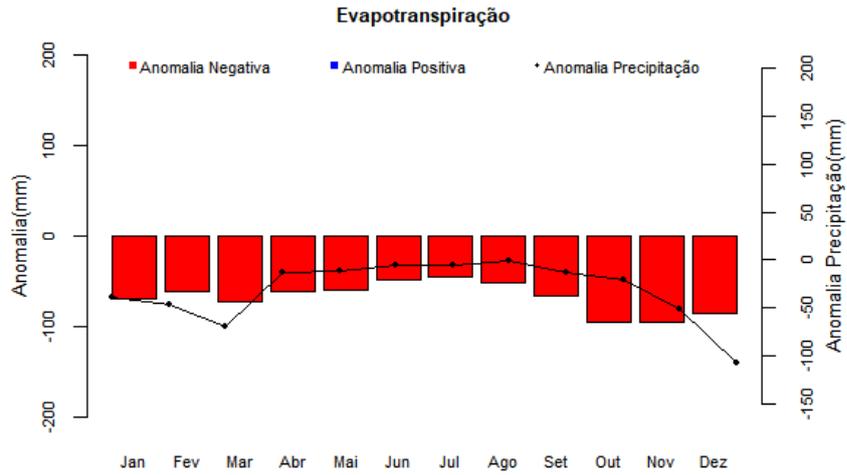


(continua)

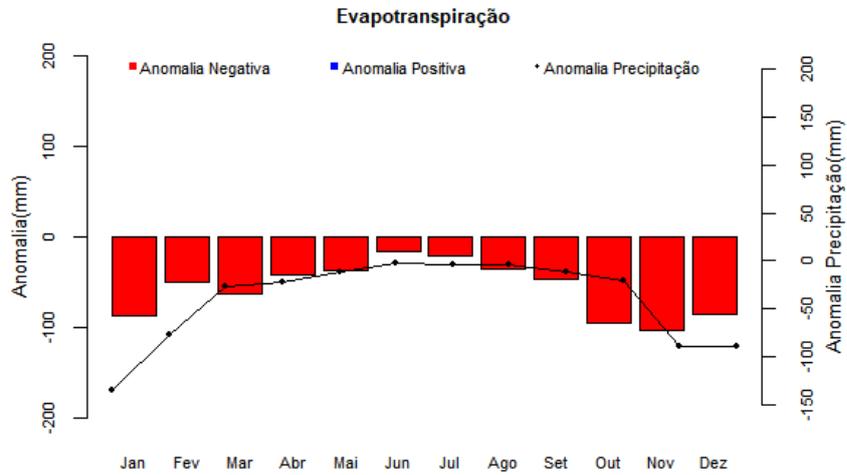
g. Paracatu



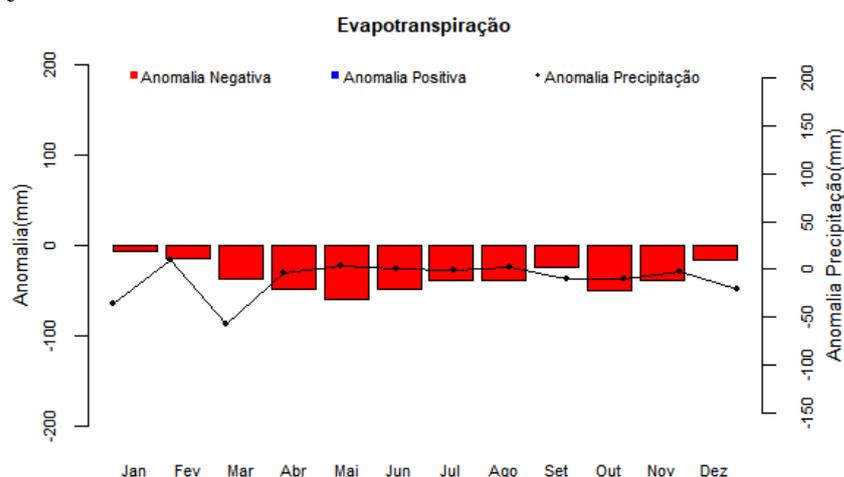
h. Pedra Azul



i. Pirapora



(continua)



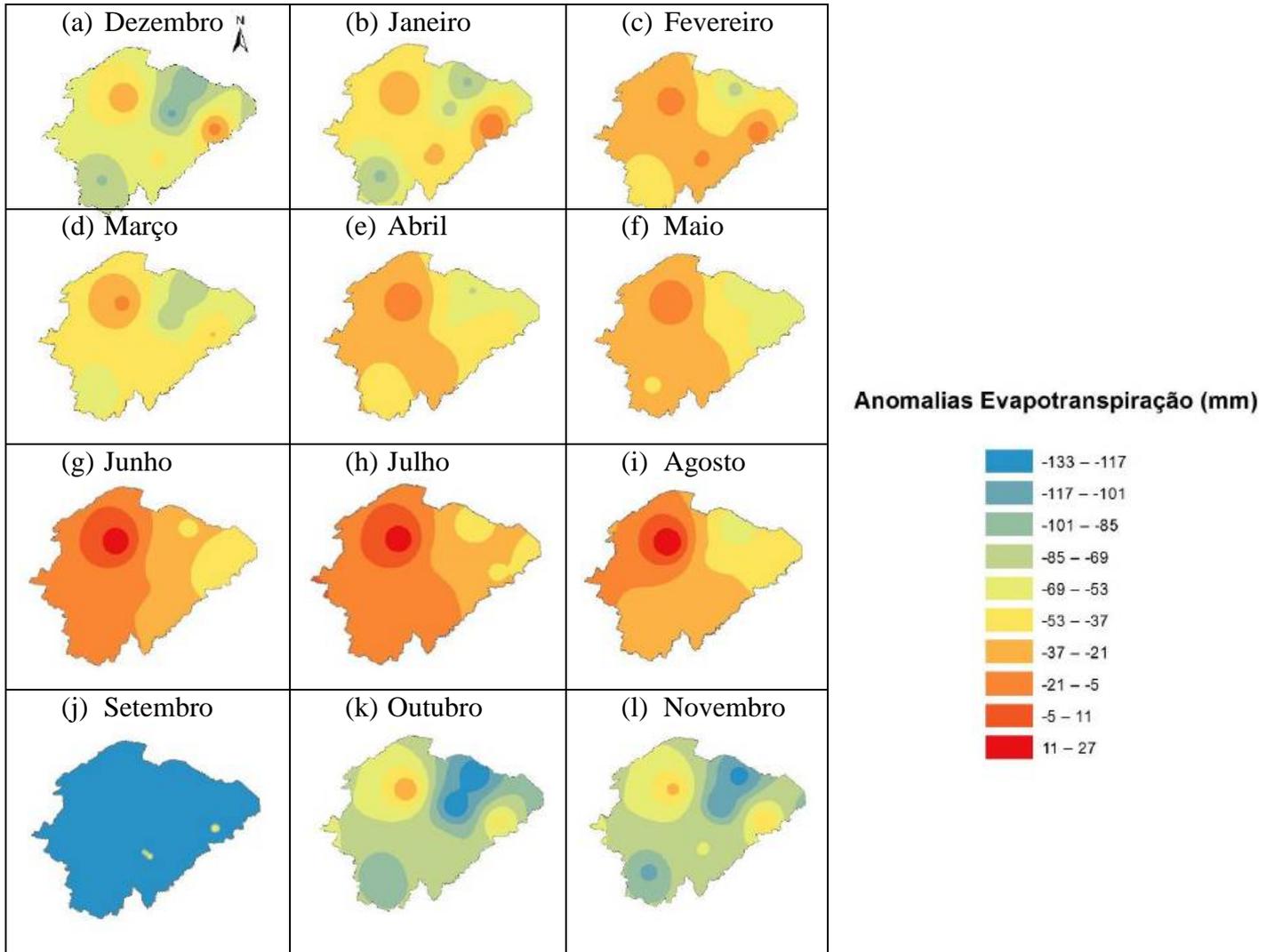
(conclusão)

As anomalias negativas de evapotranspiração e as anomalias negativas de precipitação evidenciam uma diminuição da água disponível em relação à normal climatológica, nesse caso a evapotranspiração do período é menor, o que indica um esgotamento contínuo da umidade do solo onde fluxo ascendente de água torna o solo ainda mais seco, o que sugere uma intensificação dos períodos de seca. Tal evidência pode insinuar, assim como no estudo de Careto (2017), uma possível amplificação das temperaturas do ar através do solo como consequência do feedback de umidade-temperatura. Martins et al. (2018) observaram um resultado similar, em que para o período de 2011 a 2040, foi projetado um clima mais seco e quente para o Norte de Minas, devido a tendência de redução de umidade relativa do ar e aumento da temperatura. Dessa forma, o sinal negativo corrobora com a projeção que indica uma tendência de possíveis alterações dos tipos climáticos, inclusive no período de 2009 a 2018.

4.3. Interpolação das anomalias de evapotranspiração na mesorregião Norte de Minas Gerais

A distribuição espacial das anomalias de evapotranspiração sobre a mesorregião Norte de Minas é apresentada na Figura 7 interpolada pelo método de IDW usando dados de todas as 10 estações meteorológicas.

Figura 7- Distribuição espacial das anomalias de evapotranspiração (mm.mês^{-1}) para o norte de Minas Gerais.



Fonte: Do Autor (2021)

O método IDW não deve ser usado para dados distribuídos de forma esparsa (ALLESSI, 2011)(JAKOB; YOUNG, 2006) (HODAM et al., 2017). Dessa forma, a baixa uniformidade na distribuição das estações impossibilitou a espacialização das anomalias de evapotranspiração para todo o quadrante noroeste/ nordeste de Minas Gerais, sendo possível analisar apenas a mesorregião Norte do estado cujo conjunto de pontos é denso o suficiente para capturar a variação local na extensão da superfície, fator necessário para análise, conforme demonstrado na Figura 5.

Ao avaliar a espacialização das anomalias de evapotranspiração, pode-se observar que de julho a setembro, período seco de inverno e início da primavera, há uma tendência de diminuição gradual dos valores de anomalias do Leste para oeste no norte de Minas, da faixa dos 11 a 27 mm.mês⁻¹ para a faixa -133 a 117 mm.mês⁻¹. Ressalta-se também o mês de setembro apresentou uniformidade de anomalias negativas, na faixa de -133 a -117 mm, sendo estes os maiores valores encontrados em módulo. A parte noroeste da mesorregião Norte possui os maiores valores entre os extremos de anomalias negativas (-133 mm.mês⁻¹) e positivas (27 mm.mês⁻¹) durante o período.

O pequeno número de estações meteorológicas, as lacunas nas séries existentes e a escassez de dados que podem ser causados pela desativação de algumas estações, mau funcionamento e circunstâncias ambientais que dificultam a análise da variação espacial ou temporal, torna necessário adoção de outras alternativas para superar as limitações dos métodos *in situ* de estimativa como, por exemplo, o uso de dados de assimilação (PARK; CHOI, 2015).

4.4. Dados de Assimilação do FLDAS

A Tabela 3. mostra a comparação entre as anomalias de evapotranspiração baseadas nos dados das estações meteorológicas com os dados obtidos na Plataforma Giovanni NASA (FLDAS/CHIRPS) e, os índices estatísticos, erro quadrático médio (RMSE) e viés (BIAS), a fim de validar a aplicabilidade da substituição de medições *in situ*.

Os menores valores de RMSE se concentraram, em geral, no verão e início do outono (março/abril), o que denotou uma menor variância entre os dados nesse período, merecendo destaque, o mês de abril por possuir o menor valor para todas estações, exceto Janaúba (março), Janaúria (dezembro). Comportamento semelhante foi encontrado no estudo de Paredes-Trejo et al. (2017) em que CHIRPS indicou melhores resultados para as estações chuvosas. Isso não se aplica para estação de Pedra Azul, em que os maiores valores se concentram nos períodos verão e os menores valores no inverno. O mês de novembro também merece destaque por registrar baixos valores de RMSE para as Estações de Janaúba, Juramento, Monte Azul, Montes Claros e Pirapora. Em contrapartida, os maiores valores encontrados se concentraram no período de inverno e início da primavera, mais especificamente nos meses de setembro e outubro, para todas as estações, exceto Pedra Azul.

O BIAS negativo indica que as anomalias de evapotranspiração foram subestimadas, em relação às medições *in situ*, para todas as estações no período de verão, exceto a estação de Salinas, na qual não foi subestimado em nenhum mês. Entretanto, no período de maio a setembro, os valores de BIAS foram superestimados de forma crescente, sendo que o mês de setembro apresentou a maior superestimação das anomalias em todas as estações, menos para

cidade de Formoso por não possuir dados *in situ*. De acordo com a classificação climática de Koppen, as chuvas do quadrante noroeste/nordeste concentram-se nos períodos de verão e, os meses de inverno são marcados por períodos secos. Paredes-Trejo et. al (2017) e Sikora (2019) mostraram que os dados de CHIRPS tendem a subestimar os valores altos e superestimar valores baixos de precipitação corroborando com os resultados obtidos nesse estudo.

Ao analisar a espacialização dos dados levando-se em consideração a estação de Salinas por esta apresentar maior cobertura de dados do período 2009-2018, observa-se que os resultados encontrados possuem uma grande heterogeneidade, nos períodos de inverno/primavera alcançando um RMSE de 32.5 em setembro e, boa concordância nos períodos de verão/outono, demonstrado pelo RMSE de 0.4 em abril. O resultado alcançado se repete para todas as estações, apesar da deficiência de dados nas séries históricas, exceto Pedra Azul.

Tabela 3- Comparação entre as anomalias das estações meteorológicas e anomalias Giovanni NASA e o erro quadrático médio (RMSE) e viés (BIAS).

ESTAÇÃO	Mês	Anomalias Estação Meteorológica	Anomalias Giovanni	RPD	BIAS	RMSE	%Dados
FORMOSO	Janeiro	-52,92	-36,67	30,71	-1,63	5,14	74,2
	Fevereiro	-40,81	-24,33	40,38	-1,65	5,21	69,26
	Março	-45,28	-32,00	29,32	-1,33	4,20	75,55
	Abril	-39,89	-41,18	-3,26	0,13	0,41	69,9
	Maio	-36,20	-64,52	-78,23	2,83	8,95	69,6
	Junho	-19,32	-64,87	-235,80	4,55	14,40	70,47
	Julho	-19,47	-87,88	-351,32	6,84	21,63	70
	Agosto	-31,41	-121,28	-286,14	8,99	28,42	72
	Setembro	-147,60	-147,60	0,00	0,00	0,00	0
	Outubro	-77,96	-146,83	-88,34	6,89	21,78	70
	Novembro	-66,64	-76,21	-14,36	0,96	3,03	63,88
	Dezembro	-103,49	-46,37	55,19	-5,71	18,06	70

(continua)

JANAUBA	Janeiro	-72,74	-46,58	35,97	-2,62	8,27	67,7
	Fevereiro	-52,93	-42,11	20,44	-1,08	3,42	69,5
	Março	-80,12	-78,12	2,50	-0,20	0,63	61,0
	Abril	-55,41	-89,09	-60,78	3,37	10,65	69,4
	Maiο	-45,63	-118,01	-158,65	7,24	22,89	69,0
	Junho	-32,23	-106,86	-231,60	7,46	23,60	68,0
	Julho	-31,31	-109,07	-248,35	7,78	24,59	65,8
	Agosto	-41,80	-136,11	-225,63	9,43	29,82	68,4
	Setembro	-70,32	-165,11	-134,80	9,48	29,98	62,0
	Outubro	-132,93	-186,66	-40,42	5,37	16,99	52,0
	Novembro	-118,25	-105,46	10,81	-1,28	4,04	59,7
	Dezembro	-103,49	-49,92	51,76	-5,36	16,94	59,7
JANUÁRIA	Janeiro	-22,40	-19,19	14,34	-0,32	1,02	90
	Fevereiro	-14,13	-5,92	58,08	-0,82	2,59	90,43
	Março	-17,48	-28,66	-63,95	1,12	3,53	90
	Abril	-6,74	-46,66	-591,95	3,99	12,62	90
	Maiο	-5,06	-75,46	-1390,41	7,04	22,26	90,3
	Junho	20,74	-74,49	459,19	9,52	30,11	98
	Julho	19,96	-88,51	543,46	10,85	34,30	89,3
	Agosto	25,32	-124,11	590,24	14,94	47,25	94,2
	Setembro	13,91	-162,96	1271,73	17,69	55,93	99,67
	Outubro	-25,23	-178,97	-609,42	15,37	48,62	97,1
	Novembro	-33,59	-79,96	-138,07	4,64	14,66	98,33
	Dezembro	-23,75	-21,23	10,60	-0,25	0,80	100
JURAMENTO	Janeiro	-30,12	0,05	100,17	-3,02	9,54	86,69
	Fevereiro	-15,39	15,28	199,26	-3,07	9,70	87,28
	Março	-38,66	-14,77	61,79	-2,39	7,55	84,64
	Abril	-31,86	-33,13	-3,98	0,13	0,40	86,62
	Maiο	-33,57	-64,92	-93,42	3,14	9,92	79,61
	Junho	-30,28	-70,35	-132,34	4,01	12,67	69,7
	Julho	-18,64	-79,94	-328,85	6,13	19,38	77,1
	Agosto	-20,73	-105,06	-406,70	8,43	26,67	87,1
	Setembro	-37,07	-131,00	-253,39	9,39	29,70	89,3
	Outubro	-69,66	-133,27	-91,32	6,36	20,12	86
	Novembro	-66,84	-51,24	23,34	-1,56	4,93	79,7
	Dezembro	-43,73	-0,86	98,03	-4,29	13,56	84,85

(continua)

MONTE AZUL	Janeiro	-86,93	-57,69	33,64	-2,92	9,25	50
	Fevereiro	-72,72	-50,88	30,03	-2,18	6,91	49,82
	Março	-80,77	-74,44	7,84	-0,63	2,00	49,18
	Abril	-69,80	-74,92	-7,34	0,51	1,62	50,3
	Mai	-63,00	-109,25	-73,41	4,62	14,63	50
	Junho	-38,45	-99,16	-157,91	6,07	19,20	49,16
	Julho	-44,73	-105,79	-136,51	6,11	19,31	54,52
	Agosto	-67,16	-138,84	-106,72	7,17	22,67	54,52
	Setembro	-89,02	-166,38	-86,91	7,74	24,46	56,52
	Outubro	-129,52	-184,34	-42,32	5,48	17,33	57,98
	Novembro	-123,28	-103,37	16,15	-1,99	6,30	56,71
	Dezembro	-98,56	-57,00	42,17	-4,16	13,14	46,92
MONTES CLAROS	Janeiro	-40,83	-0,45	98,89	-4,04	12,77	70,32
	Fevereiro	-26,24	14,47	155,17	-4,07	12,87	70,67
	Março	-33,46	-12,40	62,95	-2,11	6,66	71,43
	Abril	-31,44	-35,14	-11,79	0,37	1,17	69,77
	Mai	-25,29	-67,76	-167,89	4,25	13,43	70,32
	Junho	-11,65	-72,55	-522,94	6,09	19,26	70,47
	Julho	-10,20	-82,24	-706,55	7,20	22,78	66,78
	Agosto	-28,20	-110,09	-290,47	8,19	25,90	61
	Setembro	-46,08	-137,68	-198,78	9,16	28,97	60,67
	Outubro	-82,61	-137,65	-66,64	5,50	17,41	69,97
	Novembro	-70,94	-52,72	25,68	-1,82	5,76	65,67
	Dezembro	-65,19	-1,61	97,53	-6,36	20,11	60,81
PARACATU	Janeiro	-19,50	-3,80	80,52	-1,57	4,96	99,68
	Fevereiro	-5,71	14,91	361,20	-2,06	6,52	100
	Março	-15,23	5,08	133,37	-2,03	6,42	94,19
	Abril	-0,97	7,60	885,26	-0,86	2,71	99,33
	Mai	2,97	-5,82	296,14	0,88	2,78	99,35
	Junho	20,86	-18,00	186,32	3,89	12,29	100
	Julho	26,96	-54,24	301,18	8,12	25,68	100
	Agosto	27,23	-97,75	458,94	12,50	39,52	99,35
	Setembro	15,81	-130,78	927,08	14,66	46,36	100
	Outubro	-28,76	-130,65	-354,26	10,19	32,22	91,94
	Novembro	-30,48	-55,06	-80,63	2,46	7,77	99,67
	Dezembro	-31,05	-11,66	62,44	-1,94	6,13	92,56

(continua)

PEDRA AZUL	Janeiro	-69,72	-31,12	55,36	-3,86	12,21	60
	Fevereiro	-60,96	-33,99	44,25	-2,70	8,53	59,93
	Março	-73,28	-66,09	9,81	-0,72	2,27	54,19
	Abril	-60,95	-52,37	14,09	-0,86	2,72	60,2
	Maio	-60,31	-63,51	-5,32	0,32	1,01	60,33
	Junho	-48,70	-60,37	-23,95	1,17	3,69	50
	Julho	-45,27	-66,29	-46,42	2,10	6,65	50
	Agosto	-52,09	-87,57	-68,11	3,55	11,22	50
	Setembro	-66,18	-110,98	-67,70	4,48	14,17	50
	Outubro	-95,55	-114,93	-20,28	1,94	6,13	43,69
	Novembro	-95,05	-43,17	54,58	-5,19	16,41	45,67
	Dezembro	-85,40	-4,06	95,25	-8,13	25,72	49,84
PIRAPORA	Janeiro	-87,45	-28,60	67,29	-5,88	18,61	57,93
	Fevereiro	-49,78	-13,83	72,22	-3,60	11,37	70,82
	Março	-62,66	-28,18	55,02	-3,45	10,90	67,43
	Abril	-42,30	-31,17	26,32	-1,11	3,52	71,72
	Maio	-37,75	-56,48	-49,60	1,87	5,92	71,61
	Junho	-16,94	-57,78	-241,13	4,08	12,92	71,38
	Julho	-20,93	-79,96	-282,11	5,90	18,67	65,91
	Agosto	-35,72	-119,02	-233,20	8,33	26,34	65,8
	Setembro	-46,06	-148,91	-223,28	10,28	32,52	71,96
	Outubro	-95,37	-164,92	-72,93	6,95	21,99	66,78
	Novembro	-104,11	-88,53	14,96	-1,56	4,92	57,86
	Dezembro	-86,12	-39,12	54,58	-4,70	14,86	64,29
SALINAS	Janeiro	-6,21	-25,75	-314,85	1,95	6,18	100
	Fevereiro	-13,81	-33,64	-143,56	1,98	6,27	100
	Março	-36,56	-57,45	-57,14	2,09	6,61	99,68
	Abril	-48,37	-49,92	-3,20	0,15	0,49	100
	Maio	-59,98	-75,55	-25,96	1,56	4,92	100
	Junho	-48,88	-76,07	-55,61	2,72	8,60	99,67
	Julho	-37,94	-82,52	-117,47	4,46	14,10	100
	Agosto	-38,44	-114,62	-198,19	7,62	24,09	100
	Setembro	-25,01	-137,84	-451,24	11,28	35,68	99,33
	Outubro	-49,42	-153,96	-211,54	10,45	33,06	97,41
	Novembro	-38,37	-69,00	-79,83	3,06	9,69	99,67
	Dezembro	-16,30	-22,21	-36,27	0,59	1,87	99,68

(conclusão)

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, foi possível constatar que o uso das medições *in situ*, da interpolação e dos dados de assimilação contribuem para uma melhor compreensão das anomalias de evapotranspiração.

As medições *in situ* mostraram que a maior parte das estações apresentaram anomalias negativas em todos os meses do ano, ou seja, a evapotranspiração do período de 2009 a 2018 é menor em relação à climatologia, o que indica um esgotamento contínuo da umidade do solo onde fluxo ascendente de água torna o solo ainda mais seco, sugerindo uma intensificação dos períodos de seca. Ademais, observou-se uma diminuição da evapotranspiração no fim de inverno/início de primavera e nos meses de verão durante o período de estudo, o que pode prenunciar um déficit da precipitação e disponibilidade de água abaixo dos níveis normais. Corroborando com as projeções de cenários futuros que indicam possíveis alterações dos tipos climáticos, com climas mais quentes e secos.

Através da interpolação foi possível avaliar a espacialização das anomalias de evapotranspiração, há uma tendência de diminuição gradual dos valores de anomalias do leste para oeste no norte de Minas, de julho a setembro, período seco de inverno e início da primavera, da faixa dos 11 a 27 mm.mês⁻¹ para a faixa -133 a 117 mm.mês⁻¹.

Os resultados também validaram a aplicabilidade do preenchimento de falhas por meio da substituição de medições das anomalias de evapotranspiração *in situ* por dados do FLDAS, nos períodos no verão e início do outono (março/abril) onde, as estimativas de BIAS E RMSE apresentaram os menores valores.

Dessa forma, este estudo evidencia a importância de monitorar as anomalias de evapotranspiração no quadrante noroeste/ nordeste mineiro. De forma a possibilitar a elaboração de políticas públicas mais enérgicas, que servirão de instrumento para a tomada de decisões, de forma a garantir a oferta de água para abastecimento público, bem como para as práticas de agricultura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, L. P. DE; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o PADRÃO FAO), PARA MINAS GERAIS, NA AUSÊNCIA DE ALGUNS DADOS CLIMÁTICOS. **Revista engenharia agrícola**, v. 35, p. 39–50, 2015.
- ALLEN, R. G. et al. Fao, 1998. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, p. 300, 1998.
- ALLESSI, C. C. **ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DE CO₂, CH₄, RN E MICROBIOTA EM UM CAMPO PETROLÍFERO DO RECÔNCAVO BAIANO (BA)**. [s.l.] PUC-RIO, 2011.
- ANJOS, R. S. DOS. **Qualidade de Dados do Satélite Trmm para espacialização das chuvas na microrregião de Itaparica-PE**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2017.
- ARIONALDO JÚNIOR, DE S. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1–2, p. 1–7, 2012.
- BRASIL. **Atlas do Desenvolvimento Humano**.
- BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na campanha gaúcha, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 4, p. 780–793, 2014.
- CARETO, J. A. M. **The land-atmosphere coupling and climate extremes in Africa**. [s.l.] Universidade de Lisboa, 2017.
- CARVALHO, L. G. DE et al. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UMA ABORDAGEM ATUAL DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.
- CARVALHO, R. M. **ANÁLISE DE INCERTEZAS DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO ESPACIALIZADO**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- CEMADEM. Situação da seca no semi-árido e impactos. p. 8, 2019.
- DA CASTRO, F. S. et al. Evaluation of the performance of the different methods of interpolaters for parameters of the climatologic water balance. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2010.
- DAVIDSON, K. et al. CALCULATION OF MONTHLY AND ANNUAL 30-YEAR STANDARD NORMALS. v. No. 341, n. 10, 1989.
- DE ALMEIDA, L. R. et al. Tendências Meteorológicas E Anomalias De Evapotranspiração De Referência No Período De 2011-2017 Para O Estado De Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 595–613, 2020.
- DINIZ, F. DE A.; RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL, PERÍODO 1982-2010. **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**, 2010.
- DINIZ, F. DE A.; RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Brazilian climate normals for 1981-2010. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 53, n. 2, p. 131–143, 2018.
- FERNANDES, D. S. Empíricos. 2010.
- FORTINI, R. M.; SILVEIRA, S. D. F. R.; MOREIRA, V. D. S. Construção e análise do Índice de Desenvolvimento Rural para as Mesorregiões Norte e Jequitinhonha do Estado de Minas Gerais. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 6, n. 1, p. 90–119, 2016.
- FREITAS, L. O.; CALHEIROS, T.; REIS, R. J. DOS. Vulnerabilidade da mesorregião Norte de Minas Gerais face às mudanças climáticas \ The vulnerability of the Northern Minas Gerais mesoregion in the face of climate change. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 56, p. 134, 2019.
- GARDIMAN, B. S. et al. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES) / Analysis of interpolation techniques for

- spatial rainfall distribution in river basin Itapemirim (ES). **Revista Ambiência**, v. 8, n. 1, p. 61–71, 2012.
- GHARBIA, S. S. et al. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. **Science of the Total Environment**, v. 633, p. 571–592, 2018.
- HODAM, S. et al. Spatial Interpolation of Reference Evapotranspiration in India: Comparison of IDW and Kriging Methods. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 98, n. 4, p. 511–524, 2017.
- IBGE. **Estimativas de População dos municípios para 2018**.
- IBGE. **IBGE divulga as estimativas da população dos municípios para 2019**.
- INMET. **Relatório Anual do Instituto Nacional de Meteorologia**40. [s.l.: s.n.].
- IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [s.l.: s.n.].
- JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, p. 22, 2006.
- JORDAN, T. H.; GROTZINGER, J. P.; ABREU, I. D. **Para Entender a terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- KHALIL, A. A.; ESSA, Y. H.; WAHAB, A. Evapotranspiration mapping over Egypt using MODIS / Terra satellite data. **International Journal of Advanced Research**, v. 3, n. 12, p. 512–521, 2015.
- KICH, E. D. M. **CKICH, E. D. M. CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO (SEBAL)**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- ALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- LIMA, A. D. O. **ANÁLISE INTERCOMPARATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DO ESTADO DA BAHIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH: SÉRIE HISTÓRICA (1961-2014) VS. NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (1961-1990)**IOSR Journal of Economics and Finance. Fortaleza: [s.n.]. Disponível em: <https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf>http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%2C_society_and_inequalities%28Isero%29.pdf><https://www.quora.com/What-is-the>>.
- LOUZADA, F. L. R. D. O. **Balanço hídrico climatológico com dados estimados pelo Satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do rio Doce**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- MARTINS, F. B. et al. Classificação Climática De Köppen E De Thornthwaite Para Minas Gerais: Cenário Atual E Projeções Futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. November, 2018.
- MARTINS, P. A. DA S. **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS, BALANÇO HÍDRICO E CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA PARA A MESORREGIÃO SUL DO AMAZONAS**. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2019.
- MAUSER, W.; SCHÄDLICH, S. Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using remote sensing data. **Journal of Hydrology**, 1998.
- MINAS GERAIS. Perfil da Agricultura Familiar de Minas Gerais. p. 79, 2014.
- PARK, J.; CHOI, M. Estimation of evapotranspiration from ground-based meteorological data and global land data assimilation system (GLDAS). **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 29, n. 8, p. 1963–1992, 2015.
- PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 83–

89, 2017.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia agrícola.

Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas, v. 306, p. 192, 2007.

REBOITA, M. S. et al. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. Jul/dez, p. 307–326, 2015.

RICARDO, M.; VILANOVA, N.; TRANNIN, I. C. B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ETo) em regiões com escassez de dados : estudo de caso no Sul de Minas Geospatial interpolation of reference evapotranspiration (ETo) in areas with scarce data : case study in the South of M. n. 12, 2012.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Balço Hídrico**. [s.l: s.n.].

SIKORA, V. A. S. Padrões e tendências hidroclimáticas de chuva identificados por sensoriamento remoto na bacia do rio madeira - Amazônia. v. 91, n. August 2019, p. 277, 2019.

SILVA, T. J. A. et al. Balço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 392–403, 2007.

STRASSBURGER, A. S. et al. Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 273–278, 2011.

TOMCZAK, M. Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach. **Journal of Geographic Information and Decision ...**, v. 2, n. 2, p. 18–30, 1998.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. **Meteorologia e Climatologia**, v. 2, p. 449, 2006.

VIANELLO, R. L. A Estação Meteorológica E Seu Observador. **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**, 2011.

VIANELLO, R. L.; ALVES, ADIL RAINIER. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2000.

VIEIRA, L. DA C. Uso Integrado De Modelagem Matemática E Sensoriamento Remoto Para Compreensão Da Hidrodinâmica Do Reservatório Serra Azul/Mg. p. 168, 2019.

YURI, R. Y. et al. **Meteorologia noções básicas**. São Paulo: [s.n.].