



ARTHUR BOARI

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
POTENCIAL NO CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO
CLIMATOLÓGICO NAS MESORREGIÕES NORTE E
JEQUITINHONHA DE MINAS GERAIS**

**LAVRAS-MG
2020**

ARTHUR BOARI

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
POTENCIAL NO CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO
CLIMATOLÓGICO NAS MESORREGIÕES NORTE E
JEQUITINHONHA DE MINAS GERAIS**

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

Prof.^a D.Sc Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi
Orientadora
M.Sc. Olivo Bahia do Sacramento Neto
Coorientador

**LAVRAS-MG
2020**

ARTHUR BOARI

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO
CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NAS MESORREGIÕES
NORTE E JEQUITINHONHA DE MINAS GERAIS**

**METHODS FOR ESTIMATING POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN THE
CALCULATION OF THE CLIMATIC WATER BALANCE IN THE NORTE AND
JEQUITINHONHA MESOREGIONS OF MINAS GERAIS**

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

APROVADA em 21 de agosto de 2020.

D.Sc.: Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi UFLA

M.Sc.: Olivo Bahia do Sacramento Neto INMET

M.Sc.: Gabriela Rezende de Souza UFLA

M.Sc.: Vinicius Oliveira Silva UFLA

Prof.^a D.Sc. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi

Orientadora

M.Sc. Olívio Bahia do Sacramento Neto

Coorientador

LAVRAS-MG

2020

Aos meus pais por todo carinho
e dedicação

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pelas experiências e desafios concedidos a mim.

Aos meus pais, Alan e Lilian, e meu irmão Lucas por me incentivar e por manter meus pés no chão. Sou muito grato por conviver com vocês.

Aos meus avós paternos, Célio e Terezinha, e maternos, Geraldo e Maria Hortência (*In Memoriam*), por compartilhar suas experiências e ensinamentos comigo. Sou eternamente grato de ser neto de vocês. Estendo o agradecimento a todos meus tios, tias, e primos.

A minha orientadora, Prof. D.Sc. Sílvia, e meu coorientador, M.Sc. Olívio por compartilhar seus conhecimentos e por sempre me motivar a dar o meu melhor. Sou eternamente grato pela conclusão desse trabalho.

Aos demais professores envolvidos em minha formação profissional, em especial a Sílvia, Marcelo, Carlos Rogério, Jacinto e Luiz Lima por me apresentarem a suas áreas de atuação e por acender essa chama que queima e pulsa em meu coração.

A Dyego Maradona por todas as oportunidades de atuação no monitoramento da ETA/ETE da UFLA. Estendo o agradecimento a todos os operadores que sempre me receberam com carinho.

A todos os técnicos de laboratórios envolvidos na minha formação, em especial a Juliana Giacoppo, Isael, Marcos e Alex.

A ONG Engenheiros Sem Fronteiras – Núcleo Lavras e ao Núcleo de Estudos em Poluição Urbana e Agroindustrial (NEP UAI) pela oportunidade de me desenvolver pessoal e profissionalmente.

Ao Consórcio Regional de Saneamento Básico (CONSANE) pela oportunidade de realizar o meu estágio com vocês. Sou muito grato pelos ensinamentos e amizade.

Aos amigos que levarei para toda a vida, em especial Adriele Crispim, Caroline Eloi, Isabella Venturim, Larissa Barros, Marina Àzara e Sarah Franco.

A Universidade Federal de Lavras por proporcionar uma vivência rica. Que o ensino público de qualidade seja preservado.

E, por fim, agradeço aos demais que, indireta ou, diretamente impactaram profundamente os meus anos de graduação.

RESUMO

Conhecer o comportamento hidrológico de uma localidade é ferramenta indispensável para a tomada de decisão de vários segmentos, como a atividade agrícola e o gerenciamento de recursos hídricos; em especial em áreas cujo índice pluviométrico é reduzido, como no semiárido. Dessa maneira, o intuito deste trabalho foi verificar a influência de quatro métodos de estimativa de evapotranspiração, Penman-Monteith, Hargreaves & Samani, Makkink e Thornthwaite, no balanço hídrico climatológico de oito estações das mesorregiões Norte de Minas e Jequitinhonha do estado de Minas Gerais, Brasil. Os métodos de estimativa de evapotranspiração diária foram obtidos com auxílio do programa REF-ET, e sua performance foi avaliada por estatística descritiva calculada por meio da linguagem de programação R. O método de cálculo do balanço hídrico climatológico mensal escolhido foi o desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955). O método diário que obteve a melhor aprovação, para a comparação com o método Penman-Monteith, em casos de séries históricas com falhas, foi Makkink, embora o mesmo ocasione a subestimação da evapotranspiração e do balanço hídrico. Hargreaves & Samani superestimou os valores de evapotranspiração e o balanço hídrico para a maioria das estações estudadas, sendo o fator de correção da radiação extraterrestre para radiação solar um colaborador para tal efeito. O maior valor de deficit hídrico, ocorre no mês de setembro, último mês da estação seca para a região. O excesso hídrico é bem escasso, sendo assim, a baixa pluviosidade alinhada ao alto deficit hídrico traz consequências indesejáveis aos setores agrícola e de abastecimento público, em especial a agricultura de subsistência.

Palavras-chave: demanda atmosférica, deficit hídrico, REF-ET.

ABSTRACT

Knowing the hydrological behavior of a location is an indispensable tool for decision making in various segments, such as agricultural activity and water management; especially in areas where the rainfall index is reduced, as in the semi-arid. Thus, the purpose of this work was to verify the influence of four methods of evapotranspiration estimation, Penman-Monteith, Hargreaves & Samani, Makkink and Thornthwaite, on the climatological hydric balance of eight stations of the mesoregions Norte de Minas and Jequitinhonha of the state of Minas Gerais, Brazil. The daily evapotranspiration estimation methods were obtained with the help of the REF-ET program, and its performance was evaluated by descriptive statistics calculated using the R programming language. The method of calculating the monthly climatological water balance chosen was the one developed by Thornthwaite and Mather (1955). The daily method that obtained the best approval, for comparison with the Penman-Monteith method, in cases of historical series with failures, was Makkink, although the same occasion underestimates evapotranspiration and water balance. Hargreaves & Samani overestimated evapotranspiration and water balance values for most of the studied stations, being the correction factor of extraterrestrial radiation for solar radiation a collaborator for such effect. The highest value of water deficit, occurs in the month of September, last month of the dry season for the region. The excess water is very scarce, so the low rainfall in line with the high water deficit brings undesirable consequences to the agricultural and public supply sectors, especially subsistence agriculture.

Keywords: atmospheric demand, water deficit, REF-ET.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	3
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	3
2.2 DESCRIÇÃO DOS DADOS.....	6
2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ET _o	6
2.3.1 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (FAO56 - 1998).....	6
2.3.2 MÉTODO DE HARGREAVES & SAMANI (1985).....	7
2.3.3 MÉTODO DE MAKKINK (1957).....	7
2.3.4 MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948).....	8
2.4 SOFTWARE REF-ET.....	8
2.5 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO.....	9
2.6 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS.....	10
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1 DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	11
3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECIPITAÇÃO EM RELAÇÃO À NORMAL CLIMATOLÓGICA 1981-2010.....	16
3.3 ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO MENSAL.....	18
4 CONCLUSÃO.....	34
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NAS MESORREGIÕES NORTE E JEQUITINHONHA DE MINAS GERAIS

MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EN EL CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO EN LAS MESOREGIONES NORTE Y JEQUITINHONHA DE LAS MINAS GERAIS

METHODS FOR ESTIMATING POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN THE CALCULATION OF THE CLIMATIC WATER BALANCE IN THE NORTE AND JEQUITINHONHA MESOREGIONS OF MINAS GERAIS

RESUMO

Conhecer o comportamento hidrológico de uma localidade é ferramenta indispensável para a tomada de decisão de vários segmentos, como a atividade agrícola e o gerenciamento de recursos hídricos; em especial em áreas cujo índice pluviométrico é reduzido, como no semiárido. Dessa maneira, o intuito deste trabalho foi verificar a influência de quatro métodos de estimativa de evapotranspiração, Penman-Monteith, Hargreaves & Samani, Makkink e Thornthwaite, no balanço hídrico climatológico de oito estações das mesorregiões Norte de Minas e Jequitinhonha do estado de Minas Gerais, Brasil. Os métodos de estimativa de evapotranspiração diária foram obtidos com auxílio do programa REF-ET, e sua performance foi avaliada por estatística descritiva calculada por meio da linguagem de programação R. O método de cálculo do balanço hídrico climatológico mensal escolhido foi o desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955). O método diário que obteve a melhor aprovação, para a comparação com o método Penman-Monteith, em casos de séries históricas com falhas, foi Makkink, embora o mesmo ocasione a subestimação da evapotranspiração e do balanço hídrico. Hargreaves & Samani superestimou os valores de evapotranspiração e o balanço hídrico para a maioria das estações estudadas, sendo o fator de correção da radiação extraterrestre para radiação solar um colaborador para tal efeito. O maior valor de deficit hídrico, ocorre no mês de setembro, último mês da estação seca para a região. O excesso hídrico é bem escasso, sendo assim, a baixa pluviosidade alinhada ao alto deficit hídrico traz consequências indesejáveis aos setores agrícola e de abastecimento público, em especial a agricultura de subsistência.

Palavras-chave: demanda atmosférica, deficit hídrico, REF-ET.

Keywords: atmospheric demand, water deficit, REF-ET.

Palabras-clave: demanda atmosférica, déficit de agua, REF-ET.

1 INTRODUÇÃO

O norte do estado de Minas Gerais, composto pelas mesorregiões Norte de Minas e Jequitinhonha, faz parte do semiárido brasileiro. Essa região tem como característica a irregularidade espaço-temporal da precipitação. A economia regional se baseia nas atividades agrícolas, portanto, se encontra em vulnerabilidade devido as baixas precipitações anuais (ÁVILA et al., 2014). Esse comportamento pode estar associado ao clima do estado. O mesmo é considerado como de monção, cuja característica principal é a ocorrência de mais de 50% da precipitação

durante a estação chuvosa (entre outubro e março). Nos meses restantes, a atuação de vários sistemas atmosféricos como o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) acarreta na redução da ascensão de massas de ar e a entrada de frentes frias, consequentemente a redução dos índices pluviométricos durante parte do ano. Para melhor compreensão do comportamento hidroclimatológico de determinada região, faz-se necessário o estudo do balanço hídrico (REBOITA et al., 2015).

A análise climatológica de uma região pode ser realizada por meio da execução do balanço hídrico climatológico (BHC), sendo a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955) a mais utilizada. Este método permite identificar as estações seca e chuvosa, além de meses com armazenamento (*ARM*) e deficiência (*DEF*) de água no solo. Portanto, esta metodologia é importante para o planejamento e gerenciamento dos setores agrícola, hídrico e energético (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2019).

O BHC utiliza a precipitação, *P*, como variável de entrada, e a evapotranspiração, *ET*, como variável de saída de água do sistema (SILVA e FERREIRA, 2015). A evapotranspiração une dois processos simultâneos, a evaporação de superfícies líquidas e a transpiração das plantas, expressando o volume de água que se perde de uma superfície cultivada para a atmosfera. Esse conceito está relacionado principalmente às atividades agrícolas, como a irrigação de culturas (ALLEN et al., 1998).

O conceito de evapotranspiração possui várias terminologias, sendo a evapotranspiração de referência (ET_0) a reconhecida, recomendada e padronizada pelo documento nº 56 da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO). Portanto, a ET_0 representa a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência. (ALLEN et al., 1998).

Para tal aplicação, foram desenvolvidos nos últimos 50 anos, vários modelos de estimativa de ET_0 destacando-se Penman (1948), Thornthwaite (1948), Makkink (1957), Turc (1961), Priestley-Taylor (1972), Budyko (1974), Linacre (1977), Hargreaves & Samani (1985), dentre outros (GURSKI, JERSZURKI e SOUZA, 2018), visto que, os métodos de quantificação da evapotranspiração usados em campo são caros, complexos e demandam de equipe especializada para sua operação, sendo um deles os lisímetros (ALLEN et al., 1998; GURSKI, JERSZURKI e SOUZA, 2018).

Diante da variedade de métodos desenvolvidos, cada um com a sua especificidade locacional e climática, fez-se necessário definir um método como padrão. Em 1990 foi realizada uma reunião de especialistas e pesquisadores, organizada pela FAO em parceria com a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem e a Organização Meteorológica Mundial, com o objetivo de revisar as metodologias da FAO. Dessa reunião resultou-se na recomendação do método combinado

Penman-Monteith (1965) como o novo padrão para o cálculo da ET_0 , conhecido como método de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998; GAO et al., 2017).

Este método expressa a taxa de evapotranspiração de forma diária (mm dia^{-1}) e apresenta performance sofisticada por utilizar vários dados meteorológicos do ambiente, como a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento (FLUMIGNAN et al., 2016). Por outro lado, a ausência ou falha dos mesmos, pode comprometer sua aplicação. Entretanto, ao se comparar o uso de dados reduzidos com o uso de dados completos, espera-se neste método, uma variação de magnitude similar quando comparado a outros métodos (ALLEN et al., 1998).

Com essas duas variáveis, P e ET, a análise do BHC passa a ser possível, e com ela podem ser obtidas informações sobre o comportamento hidrológico do local estudado. Porém, ressalta-se a importância da metodologia adequada à ser utilizada na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0). De posse de informações sobre a variação sazonal do déficit e excedente hídrico pode-se elaborar projetos de zoneamento agrícola e ambiental e plano de gestão de bacias hidrográficas, dentre outras aplicações (SANTOS, MARTINS e SANTOS, 2018).

Neste contexto, objetiva-se com o presente estudo, avaliar e comparar o desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração em relação ao método Penman-Monteith por meio de estatística descritiva; calcular o balanço hídrico climatológico para oito estações meteorológicas instaladas nos mesorregiões Norte de Minas e Jequitinhonha; e analisar o índice pluviométrico em comparação à Normal Climatológica 1981-2010.

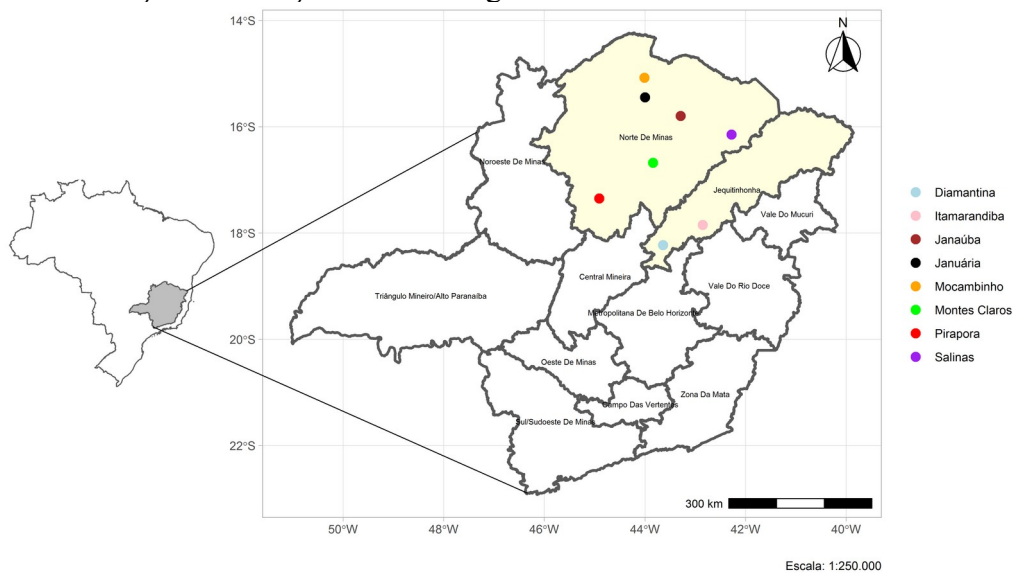
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A região estudada compreende as mesorregiões Norte de Minas e Jequitinhonha do estado de Minas Gerais, localizado na região Sudeste do Brasil. O local apresenta extensão aproximada de 178.597 km^2 e altitudes que variam de 60 a 2.040 m (SISEMA, 2020), o tipo predominante do solo é o Latossolo Vermelho-Amarelo, com potencial de armazenamento de água aproximando da capacidade de campo no verão, e do ponto de murcha permanente no inverno. De modo geral, o clima do estado é caracterizado por duas estações bem definidas, a estação chuvosa que compreende os meses de outubro a março e a estação seca entre os meses de abril a setembro (CURI et al., 1992; REBOITA et al., 2015). Na Tabela 1 estão listadas as informações climatológicas dos oito municípios estudados de acordo com a Normal Climatológica, referente ao período de 1981

a 2010 e, a população estimada em julho de 2019 (IBGE, 2019). A localização das estações pode ser visualizada na Figura 1 abaixo.

Figura 1 - Mapa do Brasil derivando contorno do Estado de Minas Gerais com a identificação da localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.



Como pode ser observado na Tabela 1, a região estudada compreende climas Aw, clima tropical de savana (Cerrado) com estação seca no inverno; e climas do tipo Cwa, clima temperado quente com inverno seco e verão quente (MARTINS et al., 2018).

Tabela 1 – Caracterização climatológica, populacional, das estações meteorológicas e dos dados dos municípios na qual se encontram as estações.

Estação	Cód.	Coordenadas		Alt. (m)	Pop. (mil hab.)	T (°C)	P (mm)	Köppen	%P	Período estudado
		Lat.	Long.							
Diamantina	83538	-18,23	-43,64	1.296,12	47,7	18,7	1.375,3	Cwa	88,60	1980 – 2016 (35)
Itamarandiba	83488	-17,85	-42,85	914,00	34,7	20,1	1.076,1	Cwa	90,52	1980 – 2009 (30)
Janaúba	83395	-15,8	-43,29	516,00	71,6	24,9	780,7	Aw	93,12	1980 – 2015 (36)
Januária	83386	-15,45	-44	473,71	67,7	24,1	948,3	Aw	92,90	1980 – 2019 (40)
Mocambinho	83389	-15,08	-44,01	452,00	38,9	24,7	834,2	Aw	91,27	1980 – 2010 (30)
Montes Claros	83437	-16,68	-43,84	652,00	409,3	23,1	1.086,4	Aw	93,12	1980 – 2019 (38)
Pirapora	83483	-17,35	-44,91	505,24	56,4	24,2	1.118,1	Aw	90,67	1980 – 2012 (33)
Salinas	83441	-16,15	-42,28	471,32	41,5	23,5	877,2	Aw	89,50	1980 – 2019 (40)

Fonte: Dados da Rede do INMET (2020), IBGE (2019).

“Cód.” é o código de cadastro da estação no catálogo da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), “Pop.” é a população estimada com referência a 01/07/2019 [mil habitantes], “T” é a temperatura média anual; “P” é a precipitação média total anual; “Köppen” é a classificação climática das estações (Martins et al. 2018); “%P” é a porcentagem do índice pluviométrico anual ocorrente na estação chuvosa.

2.2 DESCRIÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo obtidos de forma a caracterizar uma média de 30 anos de séries de dados (Tabela 1). Foram obtidas as seguintes variáveis ambientais: precipitação (P), temperatura máxima (T_x), temperatura mínima (T_i), temperatura média compensada (T), insolação (n), umidade relativa do ar (UR) e velocidade média do vento a 10 metros de altura (u_{10m}).

Em função de algumas ausências de dados ao longo dos períodos analisados, fez-se necessário o preenchimento de falhas dos dados. Para tal, foram utilizadas quatro etapas para o preenchimento de falha dos dados diários, sendo as mesmas descritas abaixo:

1. Preenchimento com média móvel de até três dias consecutivos;
2. As falhas nas variáveis de precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa do ar e insolação foram preenchidas com amparo das séries completadas por Ávila et al. (2014) para o período 1980-2009. As falhas preenchidas pelos autores foram realizadas com o auxílio do *software* PGECLIMA_R. (VIRGENS FILHO et al., 2011);
3. Preenchimento de falhas de umidade relativa do ar por meio de dados horários;
4. Preenchimento de falha na variável temperatura média do ar (T), a partir da média entre as variáveis temperatura máxima (T_x) e mínima (T_i).

2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ET_o

Neste estudo foram utilizados os métodos de Penman-Monteith (FAO56 - 1998), Hargreaves & Samani (1985), e Makkink (1957) ambos em escala diária, e Thornthwaite (1948), em escala mensal, para as estimativas da ET_o .

2.3.1 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (FAO56 - 1998)

Esse método combina o balanço de energia, a transferência de massa e as características físico-fisiológicas de uma cultura hipotética, como resistências aerodinâmicas e de superfície pré-definidas. Os atributos da superfície de referência são caracterizados pela não restrição hídrica, cultivada por espécies gramíneas em estágio de crescimento, com altura

uniforme igual a 12 centímetros, resistência de superfície igual a 70 S m⁻¹ e albedo global igual a 0,23. Considera-se, também, o não comprometimento de disponibilidade hídrica, e a total cobertura da superfície cultivada (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

Em que: “ET_o” é a evapotranspiração de referência, em mm.dia⁻¹; “Δ” é a declividade da curva de pressão de vapor, em kPa.°C⁻¹; “Rn” é a radiação líquida na superfície da cultura, em MJ.m⁻².dia⁻¹; “G” é a densidade de fluxo de calor do solo, geralmente considerado igual a zero, em MJ.m⁻².dia⁻¹; “γ” é a constante psicrométrica, em kPa.°C⁻¹; “T” é a temperatura média diária, em °C; “u₂” é a velocidade do vento à 2 metros de altura, em m.s⁻¹; “e_s” é a pressão de vapor de saturação, em kPa; e “e_a” é a pressão de vapor atual, em kPa.

2.3.2 MÉTODO DE HARGREAVES & SAMANI (1985)

Esse método foi desenvolvido com o intuito de tornar o cálculo de ET_o acessível em localizações onde a disponibilização de dados é limitada ou escassa; e ser uma alternativa a métodos que necessitam de calibração para o local de estudo. O método proposto por George H. Hargreaves e Zohrab A. Samani, depende apenas de dados de temperatura do ar e radiação extraterrestre (ALLEN et al., 1998; ALLEN e LI, 2016; HARGREAVES e SAMANI, 1985). A equação é descrita a seguir:

$$ET_o = 0,0023 \cdot Ra \cdot (T + 17,8) \cdot \sqrt{T_x - T_i} \quad (2)$$

Em que: “ET_o” é a evapotranspiração de referência da grama, em mm.dia⁻¹; “Ra” é a radiação extraterrestre, em mm.dia⁻¹; “T”, “T_x”, e “T_i” são a temperatura média, máxima, e mínima, respectivamente, do ar, em °C.

2.3.3 MÉTODO DE MAKKINK (1957)

O método de Makkink é uma simplificação e adaptação do método de Penman (1948), e é baseado na radiação e temperatura (MAKKINK, 1957; SHIRMOHAMMADI-ALIAKBARKHANI e SABERALI, 2020; VALLE JÚNIOR et al., 2020). A equação é apresentada a seguir:

$$ET_o = 0,61 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot \left(\frac{R_s}{\lambda} \right) - 0,12 \quad (3)$$

Em que: “ET_o” é a evapotranspiração referência, em mm.dia⁻¹; “R_s” é a radiação solar, em MJ.m⁻².dia⁻¹; e “λ” é o calor latente de vaporização a 20°C igual a 2,45 MJ.kg⁻¹. As demais variáveis foram descritas no item 2.4.1.

2.3.4 MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948)

Thornthwaite (1948) introduziu o conceito de ET_p , como a evapotranspiração potencial ocorrente em um mês de 30 dias com 12 horas de insolação. O autor também reportou que, ao considerar a total disponibilidade hídrica, o clima é o único influenciador sobre a ET_p .

$$ET_p = 16 \cdot Fc \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a \quad (4)$$

Em que, “ ET_p ” é a evapotranspiração mensal, em mm mês⁻¹; “ Fc ” é o fator de correção; “ T ” é a temperatura média mensal, em °C; “ I ” é o índice de calor disponível, em °C; e “ a ” é o índice térmico regional.

O fator de correção visa adaptar o valor obtido para meses com 28/29 e 31 dias, bem quanto a sua insolação média, e pode ser obtido utilizando a relação abaixo.

$$Fc = \frac{ND}{30} \cdot \frac{N}{12} \quad (5)$$

Em que, “ ND ” é o número de dias do mês; e “ N ” é a insolação média do mesmo.

O índice I envolve a somatória da temperatura média do mês, como pode ser observado na relação abaixo.

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (6)$$

Em que: “ T ” é a temperatura média do mês, em °C.

O índice a é obtido por meio de uma relação com o índice I , como pode ser observado abaixo.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (7)$$

2.4 SOFTWARE REF-ET

As estimativas de evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith (FAO56), Hargreaves & Samani (1985) e Makkink (1957) foram realizados a partir do programa *Reference Evapotranspiration Calculator* (REF-ET), desenvolvido pelo Dr. Richard Allen e pela Grace Zhenghui Li do Centro de Pesquisa e Extensão da Universidade de Idaho, EUA. O objetivo do desenvolvimento do programa foi prover computações padronizadas de evapotranspiração de referência. A versão utilizada para os cálculos deste trabalho foi a 4.1 (ALLEN e LI, 2016).

2.5 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

O balanço hídrico climatológico foi realizado com base em dados mensais para o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2019 para os locais estudados. Este estudo baseou-se na metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), que consideram a demanda de água pela atmosfera dada pela ET_P e a resposta do sistema solo-planta dada pela evapotranspiração real (ET_R). O balanço hídrico fornece estimativas da ET_R , da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC), do negativo acumulado (NAC) e do armazenamento de água no solo (ARM), a partir da entrada natural de água pelas chuvas (P) e saída natural pela ET_P por meio da capacidade de água disponível no solo (CAD), sendo está considerada igual a 100 mm para as localidades estudadas por ser um valor médio para solos brasileiros (SENTELHAS, SANTOS e MACHADO, 2008).

A diferença entre P e ET_P representa o suprimento potencial de água necessário para a vegetação de cobertura da área. Valores negativos demonstram a falta de água, ou seja, a vegetação não tem o seu requisito de água atendido; o contrário caracteriza excesso de água, ou seja, o valor demandado pela vegetação foi suprido e o excesso será destinado para recarga de aquíferos e escoamento superficial/subterrâneo (THORNTHWAITE e MATHER, 1957).

O NAC é a soma acumulada dos valores negativos da diferença entre P e ET_P , e pode ser calculado pela equação a seguir.

$$NAC = CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad (8)$$

Em que: “ CAD ” é a capacidade de água disponível, em mm.

O ARM representa a soma acumulada de valores positivos da diferença entre P e ET_P , e pode ser calculado pela equação a seguir.

$$ARM = CAD \cdot e^{\frac{NAC}{CAD}} \quad (9)$$

O CAD pode ser calculado pela equação a seguir (ALBUQUERQUE, 2010).

$$CAD = \frac{(U_{cc} - U_{pmp}) \cdot \rho \cdot z}{10} \quad (10)$$

Em que “ CAD ” é a capacidade de água disponível, em mm; “ U_{cc} ” é a umidade gravimétrica na capacidade de campo do solo, em $kg \cdot kg^{-1}$; “ U_{pmp} ” é a umidade gravimétrica no ponto de

murcha permanente, em kg.kg^{-1} ; “ ρ ” é a densidade do solo, em g.cm^{-3} ; e “ z ” é a profundidade do sistema radicular, em cm.

A alteração, ALT, sinaliza as alterações de armazenamento do solo do mês em relação ao anterior. A evapotranspiração real, ET_R , é calculada quando o valor da diferença entre P e ET_P é negativo, e então o valor de ET_P é corrigido pelo valor de ALT. Isso se deve ao fato de o solo começar a secar, então a ET_R se iguala a soma da precipitação com a alteração no armazenamento. A DEF é a diferença entre a evapotranspiração potencial e a real. O EXC ocorre apenas quando o armazenamento do solo é igual à sua capacidade de armazenar água, fator dependente de características intrínsecas a mineralogia e estrutura do mesmo (THORNTHWAITE e MATHER, 1957).

2.6 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Os dados foram analisados a partir da estatística descritiva e índices específicos para avaliar o desempenho dos métodos. Foram obtidos por meio do uso da linguagem de programação R versão 4.0.2, com o auxílio da interface *RStudio*, sendo utilizado o pacote de análises estatísticas para calibração, validação e aplicação de modelos hidrológicos, *hydroGOF* (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2020) para a obtenção do índice de exatidão, e do coeficiente de correlação de Pearson. A análise estatística avalia a performance dos modelos alternativos de evapotranspiração, Makkink e Hargreaves & Samani, com o método padrão Penman-Monteith. Não foi avaliado estatisticamente o método de Thornthwaite por ser base mensal. Foi utilizado, também, os pacotes *ggplot2* (WICKHAM, 2020) e *geobr* (PEREIRA e GONCALVES, 2020) para geração dos gráficos presentes neste trabalho.

O índice de exatidão (d) (WILLMOTT, 1982; WILLMOTT, ROWE e MINTZ, 1985) traduz a acurácia entre os métodos utilizados, ou seja, a efetividade na qual os métodos alternativos estimam a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (GURSKI, JERSZURKI e SOUZA, 2018).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (11)$$

Em que: “ d ” é o índice de exatidão de Willmott; “ P_i ” é a evapotranspiração por métodos alternativos, em mm.dia⁻¹; “ O_i ” é a evapotranspiração pelo método Penman-Monteith, em mm.dia⁻¹; e “ \bar{O} ” é a média da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith, em mm.dia⁻¹.

O índice de desempenho (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997) demonstra tanto a acurácia dos modelos quanto a precisão.

$$c = r \cdot d, 0 \leq c \leq 1 \quad (12)$$

Em que: “ c ” é o índice de desempenho; “ r ” é o coeficiente de correlação de Pearson; e “ d ” é o índice de exatidão de Willmott.

A interpretação do índice de desempenho (c) se dá pela Tabela 2 abaixo (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Tabela 2 – Classificação do índice de desempenho (c).

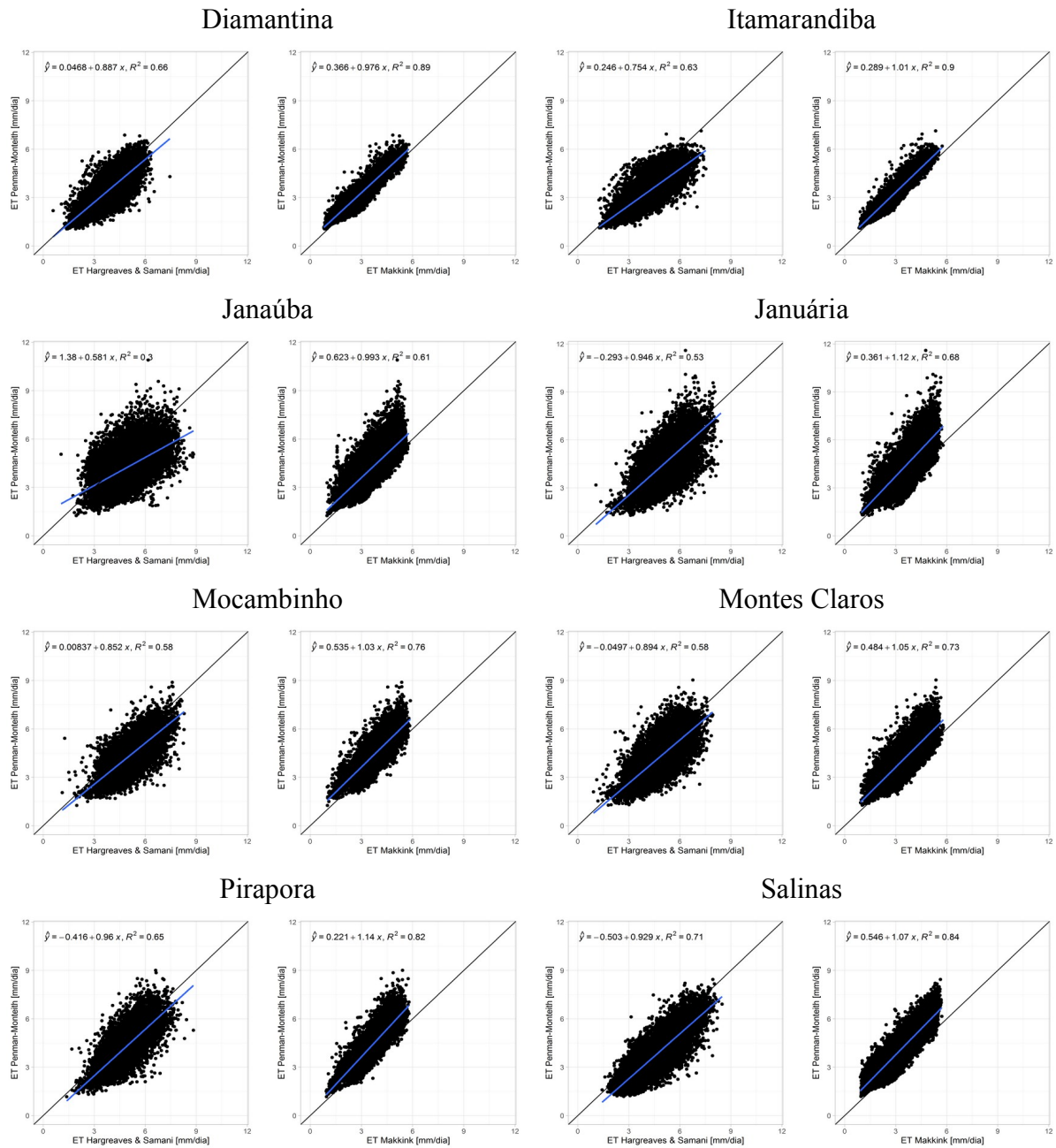
Valor do índice (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo (Ó)
0,76 a 0,85	Muito bom (Mb)
0,66 a 0,75	Bom (B)
0,61 a 0,65	Mediano (Md)
0,51 a 0,60	Sofrível (S)
0,41 a 0,50	Mau (M)
≤ 0,40	Péssimo (P)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Na Figura 2 ilustram-se as relações funcionais e as regressões lineares obtidas pelos diferentes métodos alternativos de estimativa de evapotranspiração e o método padrão Penman-Monteith FAO, para localidades situadas no norte de Minas Gerais, no período entre os anos de 1980 e 2019. Na Tabela 3, apresentam-se a estatística descritiva, os valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, variância, índices de correlação (r), índice de exatidão de Willmott (d), índice de desempenho (c) e sua respectiva classificação de em relação a Tabela 2, para os diferentes métodos de ET_o e os valores estimados pelo método padrão Penman-Monteith.

Figura 2 - Regressões lineares entre os métodos de estimativa de ET_0 e o padrão Penman-Monteith FAO em escala diária, para o período médio de 35 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2019, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.



Analisando a Figura 2 pode-se verificar que o método de Makkink subestima os valores de Penman-Monteith, enquanto Hargreaves & Samani superestima para todas as estações, com exceção de Janaúba onde pode-se observar superestimativa acima para valores acima de 3 mm e subestimativa para valores menores que 3 mm.

Tabela 3 – Análise estatística descritiva da performance dos métodos alternativos de ET, Hargreaves & Samani (HS) e Makkink (MK) tendo o método padrão da FAO, Penman-Monteith (PM) como referência. São encontrados valores de máximo, média, mediana, mínimo, desvio padrão, variância, coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação (r^2), coeficientes de regressão ($y = a + bx$), valor de p para o teste F, índice de exatidão de Willmott (d), índice de desempenho (c), e a classificação (Clas) do índice c de acordo com a Tabela 2.

Valores	Diamantina			Itamarandiba			Janaúba			Januária			Mocambinho			Montes Claros			Pirapora			Salinas		
	PM	HS	MK	PM	HS	MK	PM	HS	MK	PM	HS	MK	PM	HS	MK	PM	HS	MK	PM	HS	MK	PM	HS	MK
Máximo	6,88	7,45	5,78	7,14	7,53	5,73	10,9	8,84	5,78	11,6	8,42	5,79	8,89	8,29	5,87	9,04	7,93	5,80	9,01	8,83	5,79	8,44	8,48	5,71
Média	3,27	3,64	2,98	3,28	4,03	2,95	4,25	4,94	3,65	4,41	4,98	3,61	4,36	5,10	3,70	4,09	4,63	3,44	4,18	4,79	3,47	3,93	4,77	3,47
Mediana	3,13	3,60	2,92	3,15	3,96	2,84	4,22	4,90	3,59	4,31	4,88	3,57	4,31	5,02	3,66	3,94	4,55	3,37	4,02	4,72	3,37	3,79	4,73	3,09
Mínimo	1,05	0,58	0,80	1,10	1,24	0,84	1,25	1,05	0,98	1,28	1,06	0,98	1,26	1,12	1,00	1,27	0,92	0,93	1,17	1,38	0,94	1,18	1,43	0,92
Desvio P.	1,06	0,97	1,02	1,06	1,12	0,99	1,24	1,17	0,97	1,35	1,03	0,99	1,17	1,05	0,98	1,24	1,05	1,01	1,23	1,03	0,98	1,30	1,18	1,11
Variância	1,12	0,94	1,05	1,12	1,25	0,97	1,55	1,36	0,95	1,81	1,07	0,98	1,36	1,09	0,97	1,54	1,11	1,02	1,52	1,06	0,95	1,68	1,39	1,22
r	-	0,81	0,94	-	0,80	0,95	-	0,55	0,78	-	0,73	0,82	-	0,76	0,87	-	0,76	0,85	-	0,80	0,91	-	0,84	0,92
r^2	-	0,66	0,89	-	0,63	0,9	-	0,3	0,61	-	0,53	0,68	-	0,58	0,76	-	0,58	0,73	-	0,65	0,82	-	0,71	0,84
a	-	0,05	0,37	-	0,25	0,29	-	1,38	0,62	-	-0,29	0,36	-	0,008	0,54	-	-0,05	0,48	-	-0,42	0,22	-	-0,5	0,55
b	-	0,89	0,98	-	0,75	1,01	-	0,58	0,99	-	0,95	1,12	-	0,85	1,03	-	0,89	1,05	-	0,96	1,14	-	0,93	1,07
p	-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶		-	<2,2.10 ⁻¹⁶	
d	-	0,87	0,95	-	0,80	0,95	-	0,68	0,81	-	0,79	0,79	-	0,78	0,79	-	0,82	0,84	-	0,83	0,85	-	0,82	0,86
c	-	0,71	0,90	-	0,64	0,90	-	0,37	0,63	-	0,58	0,65	-	0,60	0,69	-	0,62	0,72	-	0,67	0,77	-	0,70	0,79
Clas.	-	Mb	Ó	-	Md	Ó	-	P	Md	-	S	Md	-	S	B	-	Md	B	-	B	Mb	-	B	Mb

Em que: “Mb” é Muito bom, “Ó” é Ótimo, “Md” é Mediano, “P” é Péssimo, “S” é Sofrível, e “B” é Bom.

Ao analisar a estatísticas apresentada na Tabela 3, em especial o desvio padrão, pode-se inferir que ambos métodos não apresentaram grandes variações em torno da média, sendo o valor máximo observado de 1,35 e mínimo de 0,97. Pode-se observar que o valor médio para Hargreaves & Samani é superior ao de Penman-Monteith, e o de Makkink é inferior. As regressões lineares para ambos os métodos foram adequadas, pois pelo teste F foi possível verificar um valor de p menor que 0,05.

O índice de exatidão de Willmott (c), no entanto, deixa claro que o método de Makkink possui exatidão maior que a provida pelo método Hargreaves & Samani. Pode-se destacar que ambos métodos diários alternativos tiveram uma exatidão bem próxima para as estações Januária, Mocambinho, Montes Claros, Pirapora e Salinas, sendo esta última a que se destaca por apresentar os maiores valores de c para ambos os métodos.

O índice de desempenho (d) deixa claro que Makkink possui performance superior a Hargreaves & Samani, mas o desempenho de ambos se aproxima para as estações Montes Claros, Pirapora de Salinas.

Silva et al. (2018) avaliaram o desempenho de vários métodos de estimativa de evapotranspiração para a estação Mocambinho (Jaíba, MG) para o período de 2007 a 2016. Para o método de Hargreaves & Samani, o coeficiente de determinação encontrado pelos autores foi de 0,6539. O valor encontrado no presente trabalho (0,58) pode ter sido influenciado, devido ao volume de dados analisados três vezes maior (1980 a 2010), consequentemente, maior variabilidade sazonal, bem como limitações do método de estimativa, pois o mesmo considera apenas valores de temperatura e radiação solar, sendo esta estimada para o local citado.

Noia et al. (2014) compararam o desempenho do método de Hargreaves & Samani com o método de Penman-Monteith para o município de Dourados, MS (Cwa) para o ano de 2008. Para o cálculo diário da ET_0 foi encontrado o valor de r igual a 0,77. O valor é inferior ao encontrado em Diamantina (0,81) e Itamarandiba (0,8), ambos com mesma classificação climática. O resultado sugere que o desempenho do método seja melhor quando trabalhado em período maior de dados. Quando analisado o comportamento mensal do método, os autores encontraram valor de r igual a 0,84, o que corrobora com a hipótese de que o método possui um melhor desempenho quando se usa um período maior de dados.

O que pode explicar o melhor desempenho do método de Makkink é o fato de ser dependente apenas da radiação solar (R_s), enquanto o método de Hargreaves & Samani

depende da radiação solar extraterrestre (R_a) (topo da atmosfera), embora a mesma seja convertida a R_s por meio da amplitude de temperatura. O cálculo da radiação solar de Makkink envolve a adaptação da R_a quanto a razão insolação/fotoperíodo, sendo que dados de insolação são mais sensíveis a nebulosidade do que a temperatura na conversão de R_a de Hargreaves & Samani.

3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECIPITAÇÃO EM RELAÇÃO À NORMAL CLIMATOLÓGICA 1981-2010

De posse dos valores de precipitação dos dados analisados e dos valores de precipitação obtido na Normal Climatológica de 1981-2010, disponibilizada pelo INMET, foi gerada a Tabela 4, que apresenta a contabilização da quantidade de meses que possuíam índice pluviométrico mensal inferior ao da Normal, para as diferentes localidades estudadas.

Tabela 4 – Análise da quantidade de meses (n) com índice pluviométrico total em relação ao índice pluviométrico da Normal Climatológica 1981-2010 (P_{NC}), em mm.

Meses	Diamantina		Itamarandiba		Janaúba		Januária		Mocambinho		Montes Claros		Pirapora		Salinas	
	P_{NC}	n	P_{NC}	n	P_{NC}	n	P_{NC}	n	P_{NC}	n	P_{NC}	n	P_{NC}	n	P_{NC}	n
Jan.	236,70	19	185,90	15	155,20	22	151,30	21	149,50	16	191,80	21	216,20	19	136,00	27
Fev.	142,70	20	104,30	17	75,70	26	115,50	26	95,00	17	108,70	25	111,60	21	77,10	22
Mar.	185,00	19	135,70	21	113,50	22	147,10	25	112,00	16	154,10	23	139,10	20	136,70	25
Abr.	76,60	24	46,90	17	33,80	20	45,20	25	54,40	19	38,60	21	51,10	18	48,40	26
Mai.	22,90	22	12,90	20	6,60	22	7,10	28	7,90	19	8,80	28	15,00	25	14,50	26
Jun.	6,30	22	4,10	17	1,50	30	2,80	33	1,70	24	4,40	32	3,70	26	3,50	24
Jul.	4,70	23	5,80	20	0,60	30	1,10	36	0,80	25	0,80	33	4,70	27	5,10	27
Ago.	13,20	22	8,00	21	3,10	32	1,80	31	1,30	23	2,00	29	6,60	26	2,70	25
Set.	33,10	18	24,30	16	8,10	24	9,30	25	6,70	18	20,20	24	23,20	18	18,00	28
Out.	118,50	24	98,70	17	47,60	22	61,10	26	58,40	13	83,10	25	83,50	19	72,80	25
Nov.	232,70	20	222,50	14	164,50	22	186,10	23	153,70	16	224,40	20	218,90	19	176,30	24
Dez.	302,90	21	227,00	12	170,50	15	219,90	21	192,80	16	249,50	21	244,50	17	186,10	22

Em que “ P_{NC} ” é a precipitação mensal da Normal Climatológica 1981-2010, em mm; “ n ” é a quantidade de meses dentro do período estudado que possui índice pluviométrico inferior ao da Normal.

Observa-se na Tabela 4, que os meses de junho, julho e agosto costumam ser os meses mais secos na maioria das estações estudadas. Vale ressaltar que estações como Diamantina e Salinas não apresentam grandes variações em relação a quantidade de meses mais secos, enquanto as demais possuem maiores quantidades no período seco correspondente ao outono e inverno. Destaca-se o mês de julho de Januária como o mais seco, correspondendo a 90% do período analisado com índice pluviométrico inferior ao da Normal Climatológica.

3.3 ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO MENSAL

O BHC mensal foi contabilizado de acordo com a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955). Foi realizado o BHC com base na Normal Climatológica 1981-2010, e a ET_p estimada de acordo com o método de Penman-Monteith, de modo a comparar com o BHC realizado a partir dos métodos de estimativa de evapotranspiração Thornthwaite, Hargreaves & Samani, Penman-Monteith e Makkink, para o período delimitado. As Figuras 3 a 10 ilustram os gráficos de balanço hídrico e seus extratos para cada uma das estações meteorológicas analisadas.

Figura 3 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Diamantina: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 35 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2016, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

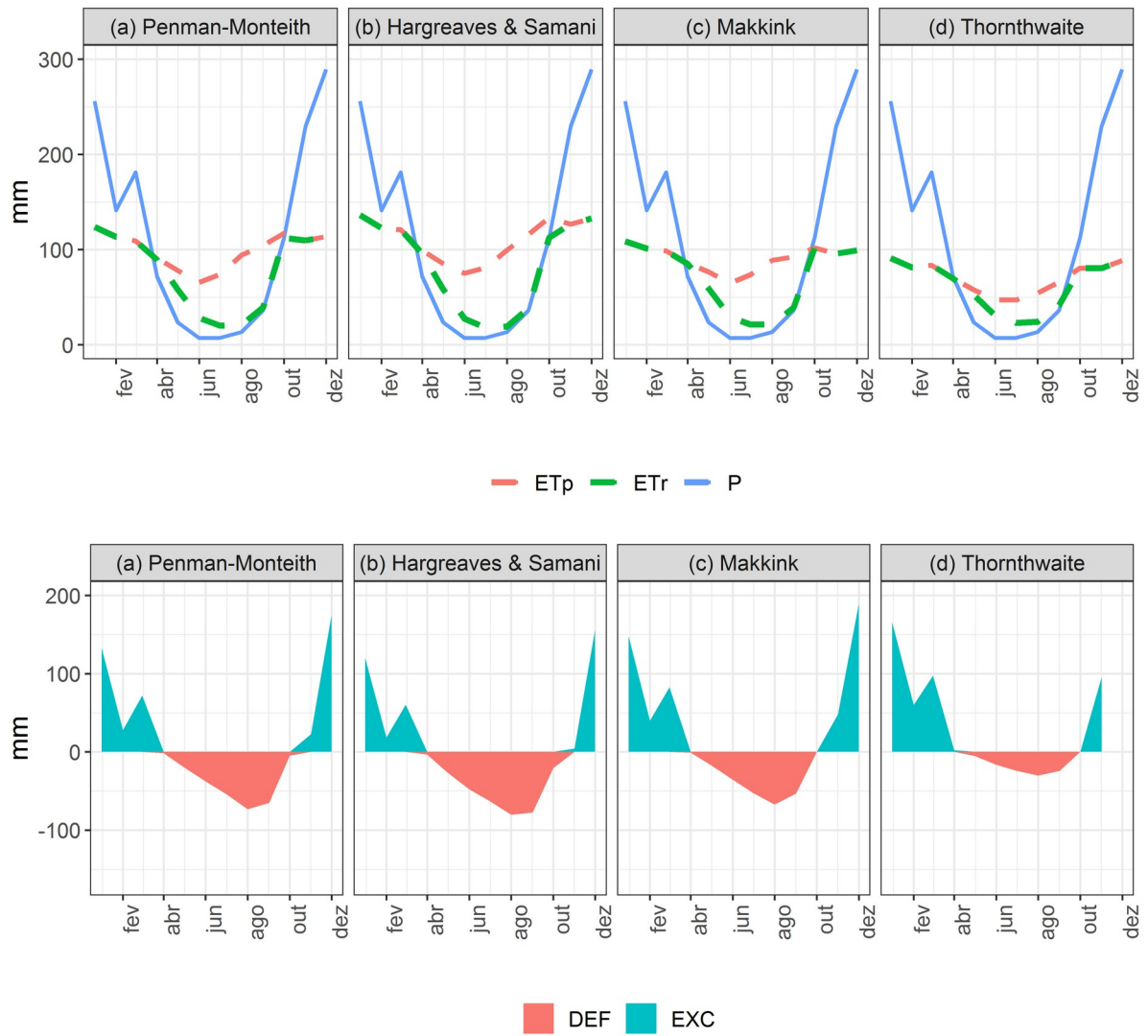


Figura 4 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Itamarandiba: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 30 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2009, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

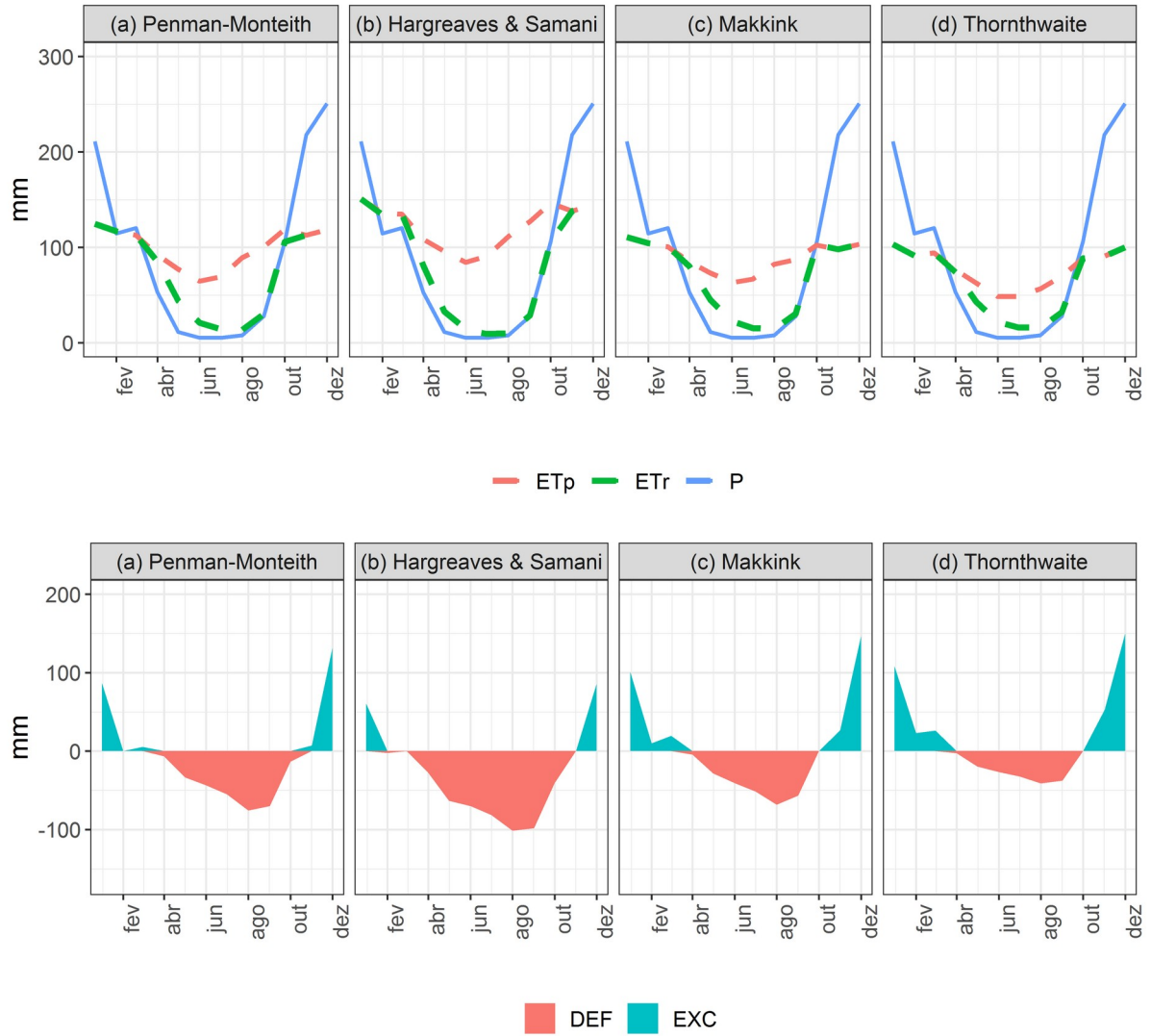


Figura 5 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Janaúba: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 36 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2015, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

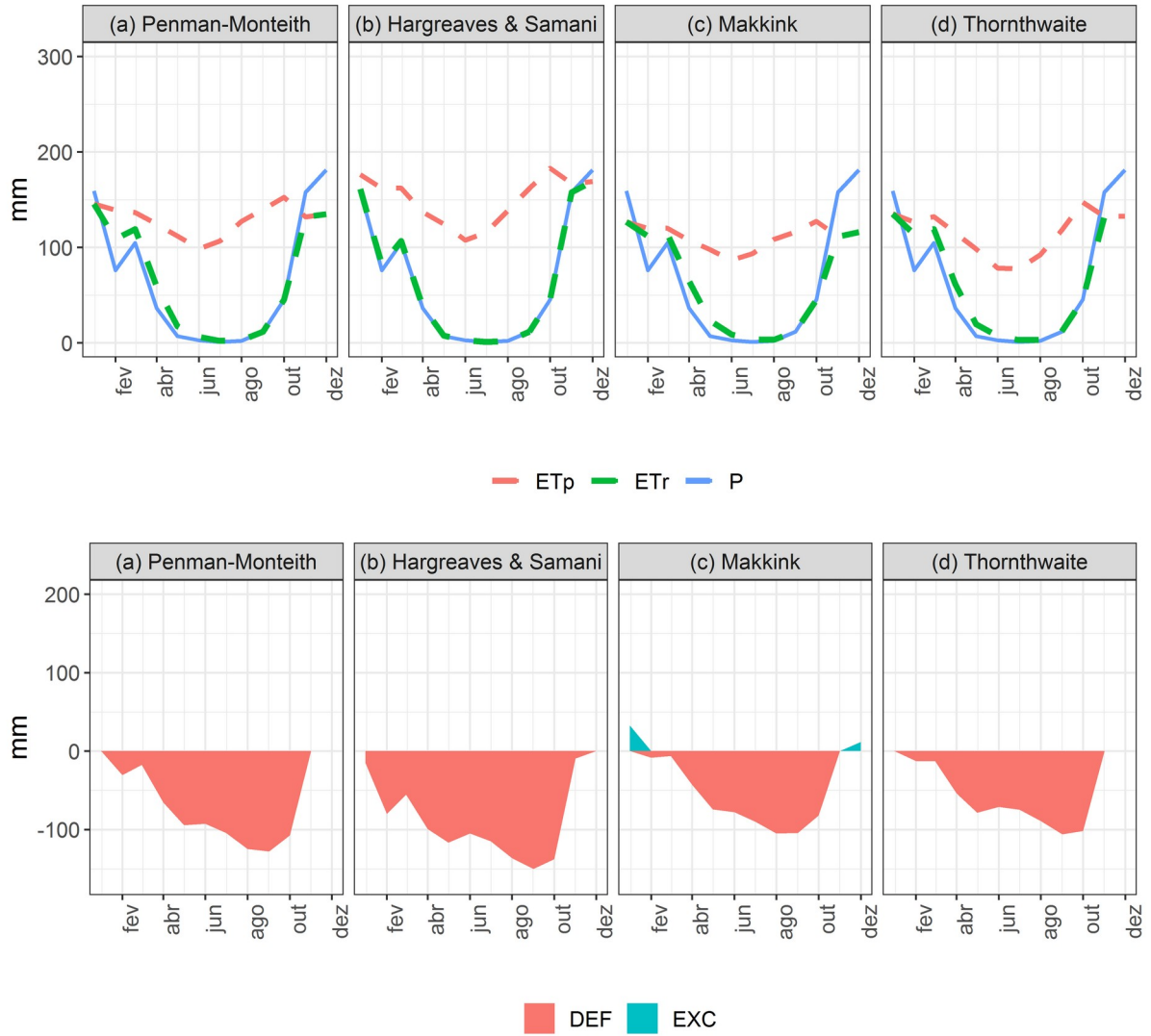


Figura 6 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Januária: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período de 40 anos, entre os anos de 1980 a 2019, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

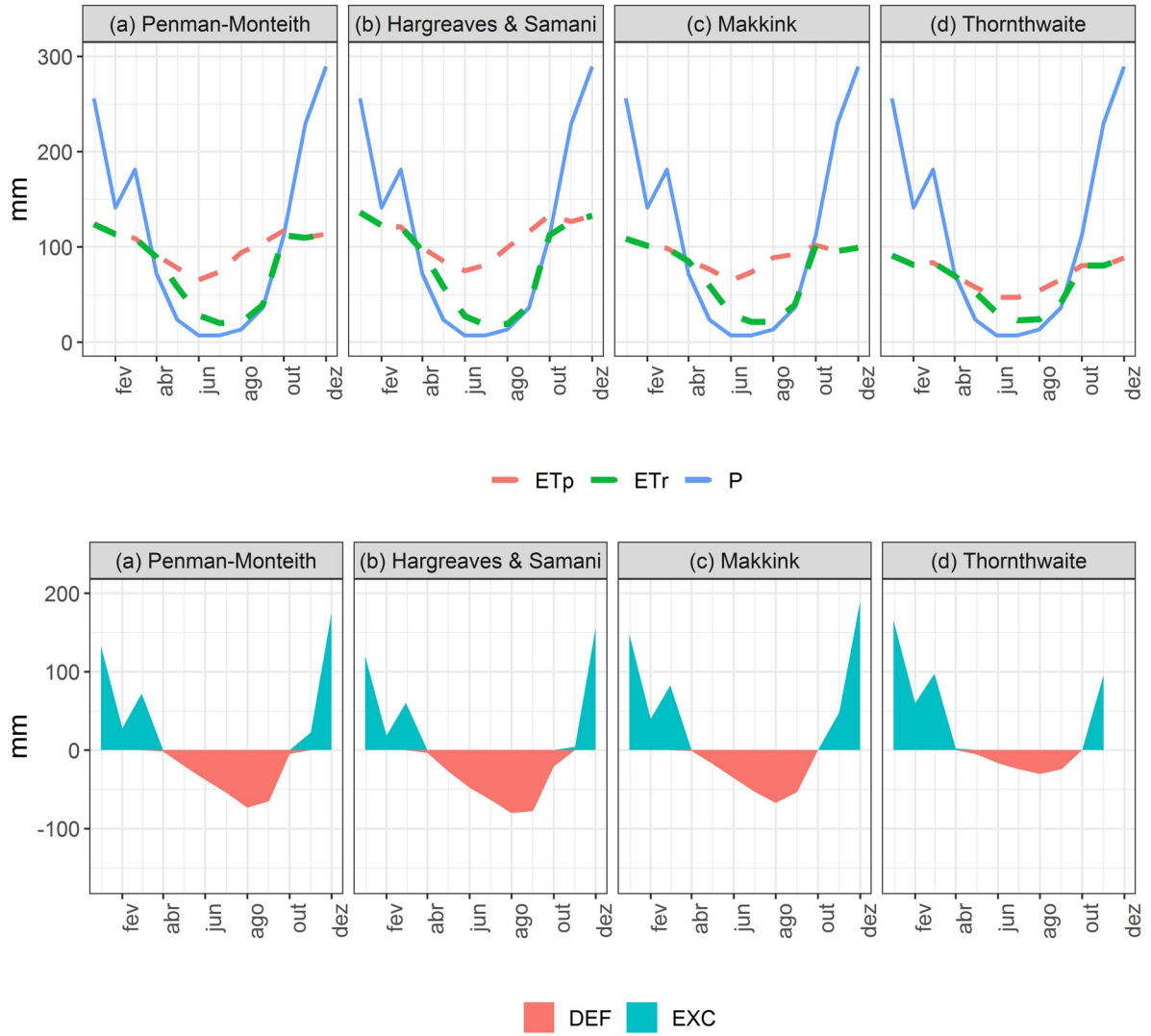


Figura 7 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Mocambinho: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 30 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2010, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

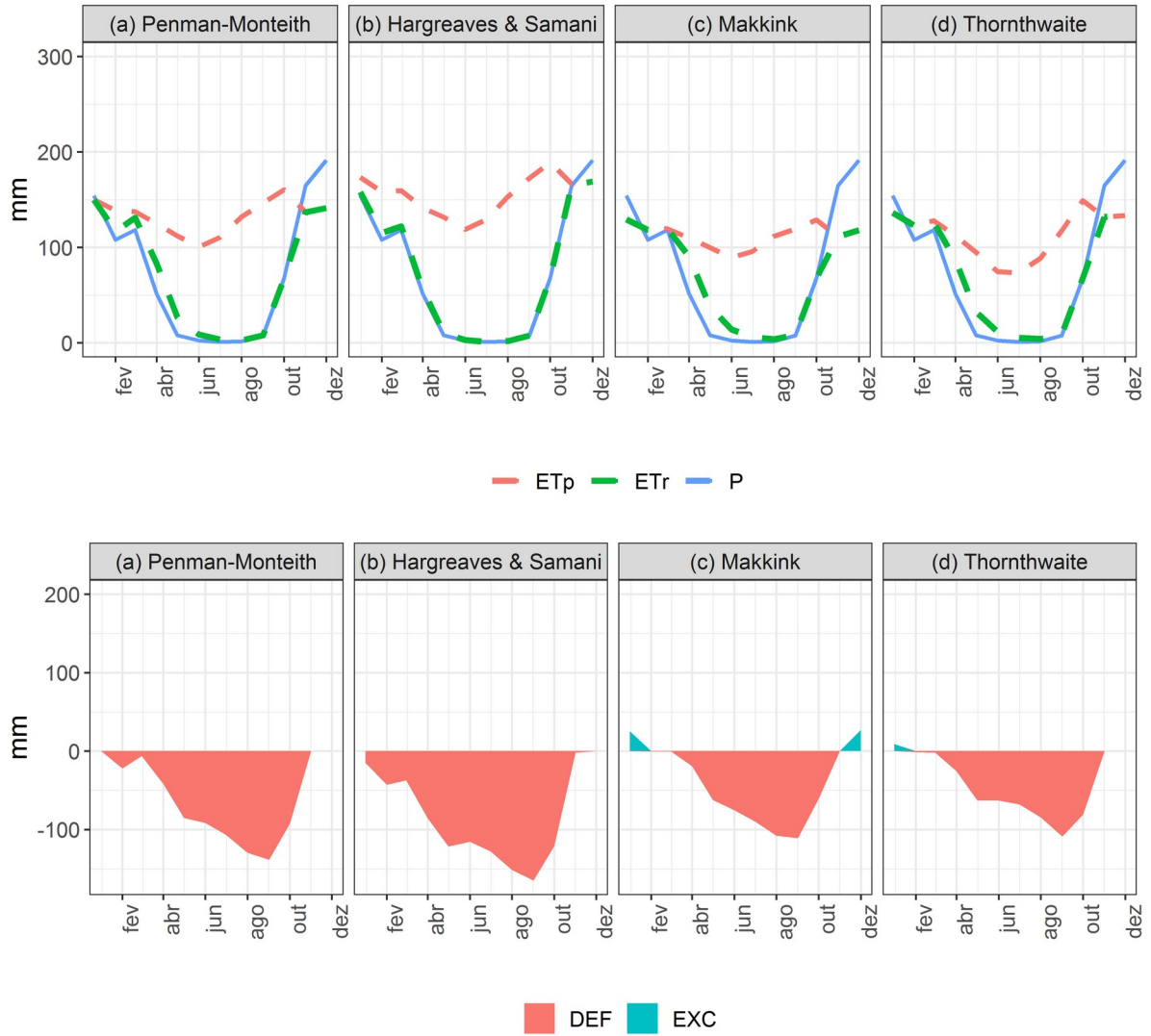


Figura 8 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Montes Claros: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 38 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2019, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

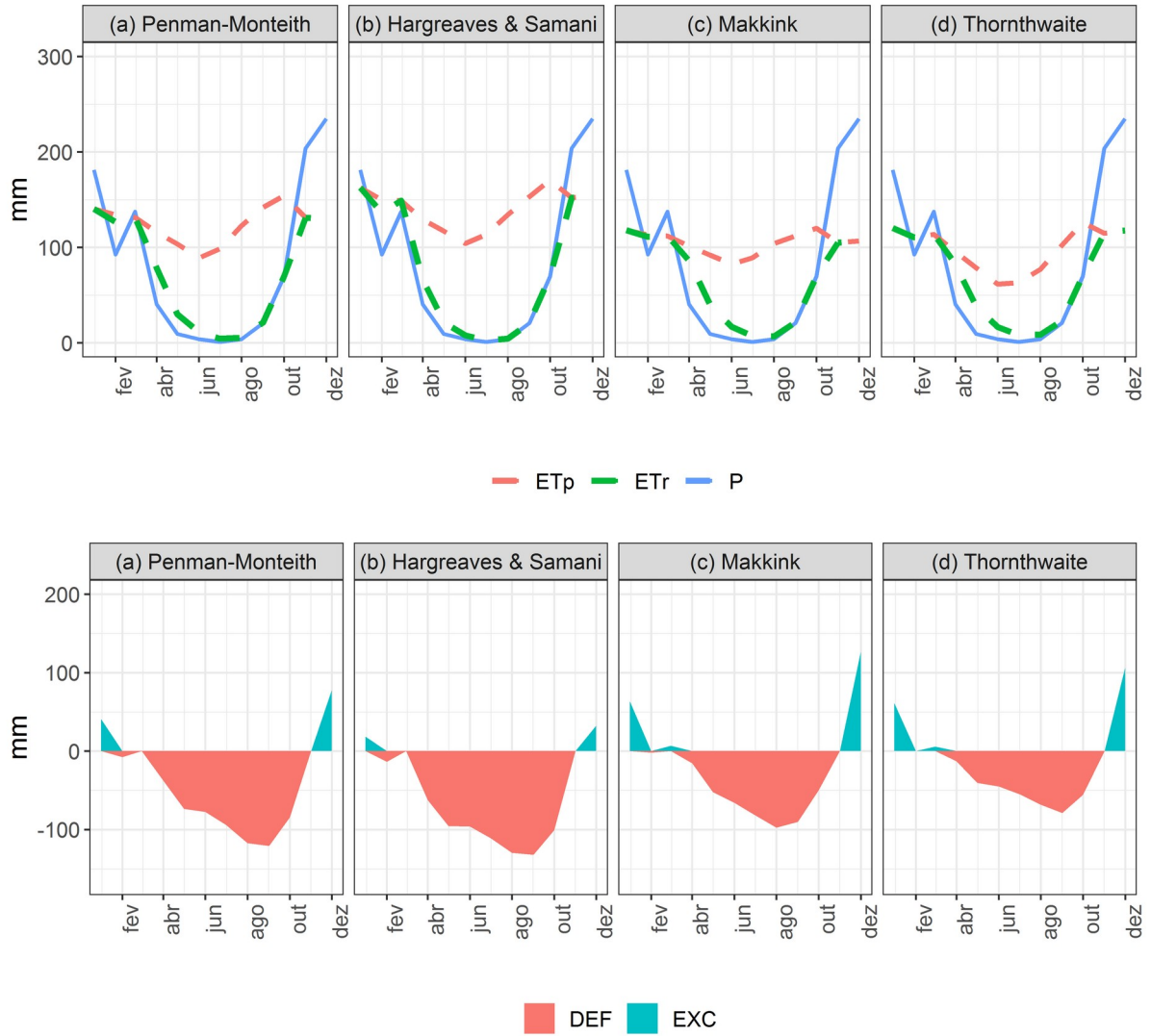


Figura 9 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Pirapora: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 33 anos, compreendido entre os anos de 1980 a 2012, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.

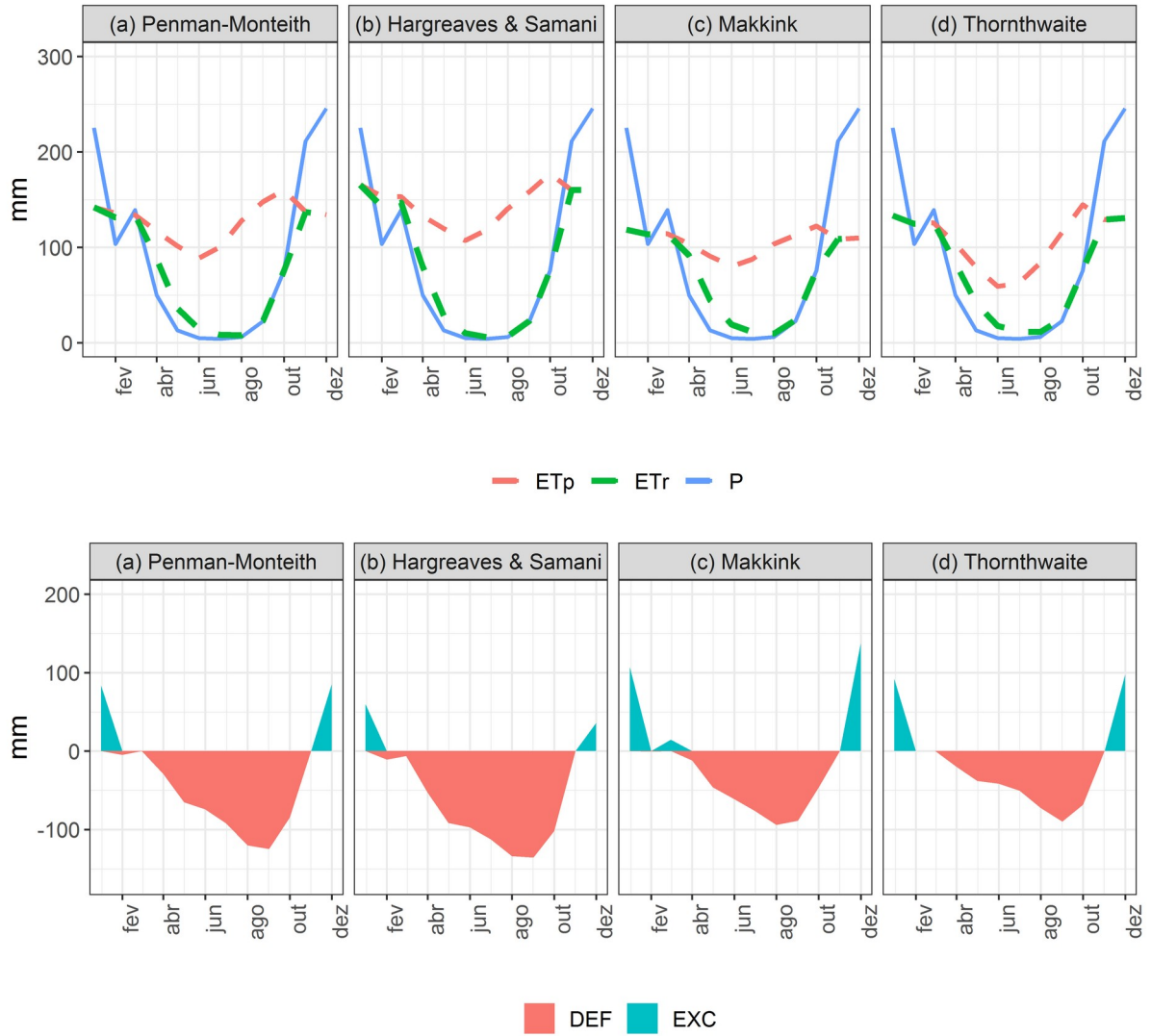
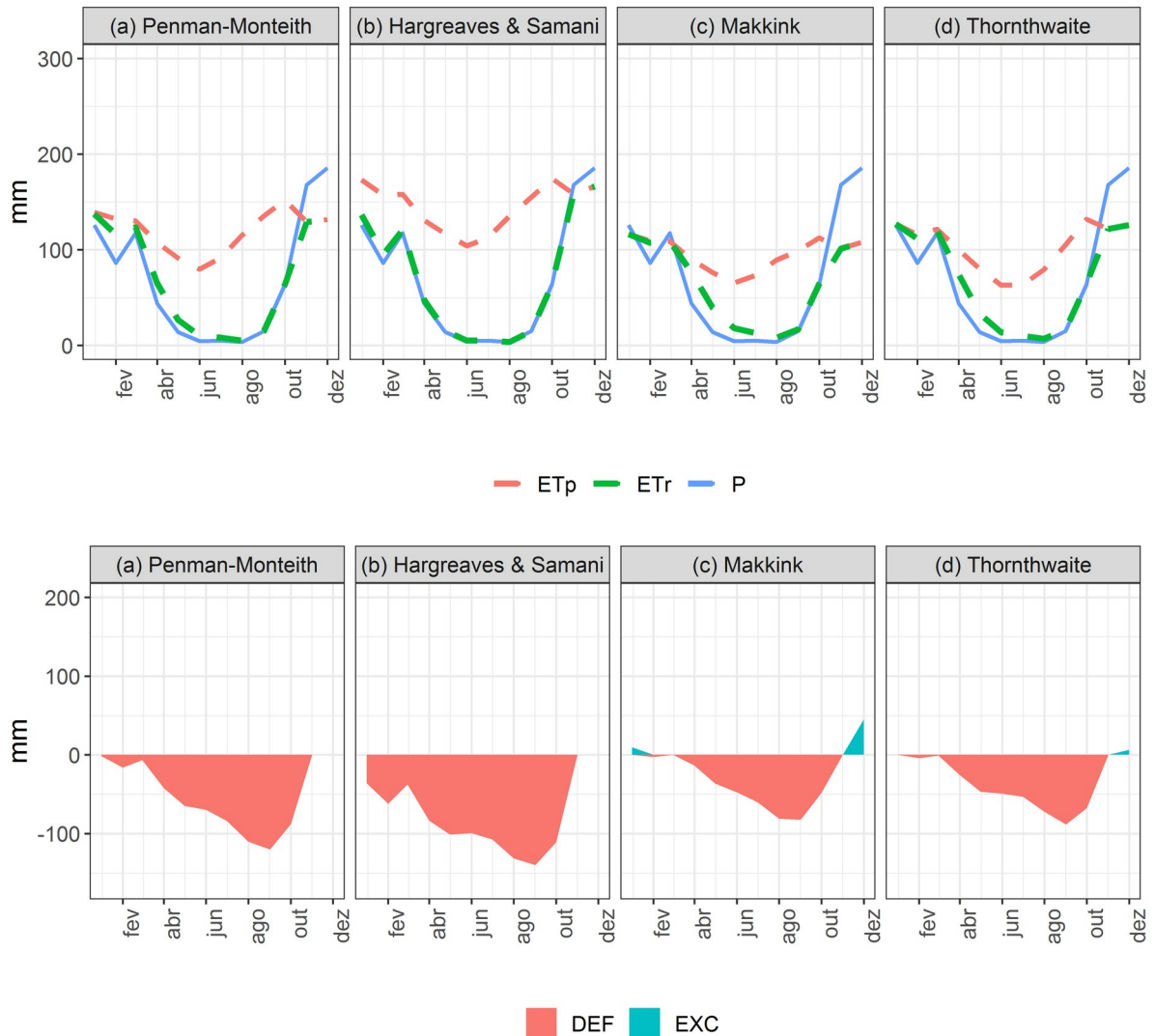


Figura 10 - Balanço hídrico climatológico (BHC) e seu extrato para a estação de Salinas: (a) ET_p estimada pelo método de Penman-Monteith, (b) ET_p estimada pelo método de Hargreaves & Samani, (c) ET_p estimada pelo método de Makkink e (d) ET_p estimada pelo método de Thornthwaite, para o período médio de 40 anos, entre os anos de 1980 a 2019, para as diferentes localidades do norte de Minas Gerais.



Ao analisar as Figuras 3 a 10 pode-se concluir que Hargreaves & Samani superestimou, e Makkink e Thornthwaite subestimaram o valor de ET_p , de modo geral quando comparado com Penman-Monteith. Em Janaúba (Figura 5), Thornthwaite teve um desempenho aparente próximo a Penman-Monteith entre setembro e outubro. Pode-se identificar que os métodos Thornthwaite e/ou Makkink apresentam valores de EXC em contraste aos demais métodos para as estações Janaúba (Figura 5), Mocambinho (Figura 7) e Salinas (Figura 10). Em Janaúria (Figura 6) apenas o método de Hargreaves & Samani não apresenta período de EXC. O período de DEF para as estações Diamantina (Figura 3) e

Itamarandiba (Figura 4), ambas Cwa, começa em abril e termina em outubro; para o restante o período é mais longo, começando em fevereiro e terminando próximo a novembro e dezembro, momento com presença de leve EXC.

De modo a analisar melhor os resultados apresentados nos gráficos acima, gerou-se a tabela a seguir. São apresentados os dados anuais de cada uma das variáveis do BHC para a Normal Climatológica 1981-2010 com ET_p por Penman-Monteith (Seção 1) e do BHC para o banco de dados deste trabalho com ETP estimada por Penman-Monteith (Seção2), Hargreaves & Samani (Seção 3), Makkink (Seção 4) e Thornthwaite (Seção 5).

Tabela 5 – Balanço Hídrico Climatológico (BHC) para as estações analisadas. A seção 1 corresponde do BHC da Normal Climatológica 1981-2010 com evapotranspiração potencial (ET_p) estimada por Penman-Monteith. As seções restantes (2, 3, 4 e 5) correspondem ao BHC do período de dados de cada estação com ET_p estimada por método. São apresentados dados de Precipitação (P), Excesso (valores positivos) ou Escassez (valores negativos) de Precipitação ($P - ET_p$), Armazenamento do solo (ARM), Evapotranspiração Real (ET_R), Deficiência (DEF) e Excedente (EXC) Hídrico. Todos os valores são apresentados em $mm \cdot ano^{-1}$. (Continua)

Estação	P	ET_p	$P - ET_p$	ARM	ET_R	DEF	EXC
1 – Normal Climatológica 1981-2010							
Diamantina	1.375,3	1.227,1	148,2	671,1	947,7	279,4	427,6
Itamarandiba	1.076,1	1.196,1	-120,0	614	868,5	327,7	207,6
Janaúba	780,7	1.301,1	-520,4	407,0	764,0	537,1	16,7
Januária	948,3	1.682,7	-734,4	467,5	917,5	765,2	30,8
Mocambinho	834,2	1.588,7	-754,5	302,6	834,2	754,5	0
Montes Claros	1.086,4	1.551,6	-465,2	528,8	926,9	624,7	159,5
Pirapora	1.118,1	1.524,7	-406,6	517,5	948,3	576,4	169,7
Salinas	877,2	1.420,8	-543,6	471,7	871,7	549,1	5,5
2 – Penman-Monteith							
Diamantina	1.368,5	1.194,4	174,1	682	937,8	256,6	430,7
Itamarandiba	1.131,0	1.197,2	-66,1	638,7	899,7	297,5	231,3
Janaúba	784,5	1.549,9	-765,4	300,1	784,5	765,4	0
Januária	924,9	1.611,5	-686,6	442,6	889,2	722,3	35,7
Mocambinho	876,1	1.591,0	-714,9	366,7	876,1	714,9	0
Montes Claros	998,8	1.492,7	-493,9	466,0	879,8	612,9	119,0
Pirapora	1.101,7	1.527,1	-425,4	490,8	932,5	594,6	169,2
Salinas	832,3	1.435,2	-602,9	352,2	832,2	603,0	0

Tabela 5 - Balanço Hídrico Climatológico (BHC) para as estações analisadas. A seção 1 corresponde do BHC da Normal Climatológica 1981-2010 com evapotranspiração potencial (ET_P) estimada por Penman-Monteith. As seções restantes (2, 3, 4 e 5) correspondem ao BHC do período de dados de cada estação com ET_P estimada por método. São apresentados dados de Precipitação (P), Excesso (valores positivos) ou Escassez (valores negativos) de Precipitação ($P - ET_P$), Armazenamento do solo (ARM), Evapotranspiração Real (ET_R), Deficiência (DEF) e Excedente (EXC) Hídrico. Todos os valores são apresentados em $mm.ano^{-1}$. (Continua)

Estação	P	ET_P	$P - ET_P$	ARM	ET_R	DEF	
3 – Hargreaves & Samani							
Diamantina	1.368,5	1.328,6	40	655,0	1.008,9	319,6	359,6
Itamarandiba	1.131,0	1.469,6	-338,5	492	984,5	485,1	146,6
Janaúba	784,5	1.804,3	-1.019,8	30,6	784,5	1.019,8	0
Januária	924,9	1.815,8	-890,9	253,2	924,9	890,9	0
Mocambinho	876,1	1.862,1	-986,0	63,9	876,1	986,0	0
Montes Claros	998,7	1.689,0	-690,3	381,7	947,6	741,4	51,1
Pirapora	1.101,7	1.747,7	-646,0	399,6	1.005,6	742,1	96,1
Salinas	832,3	1.742,1	-909,8	73,7	832,3	909,8	0
4 – Makkink							
Diamantina	1.368,5	1.087,3	281,2	706,6	860,4	226,9	508,1
Itamarandiba	1.131,0	1.076,7	54,4	661,0	827	249,7	304,1
Janaúba	784,5	1.331,5	-547,0	411,6	740,2	591,3	44,3
Januária	924,9	1.317,8	-392,9	556,2	795,0	522,8	129,9
Mocambinho	876,1	1.351,5	-475,4	513,7	824,3	527,2	51,8
Montes Claros	998,8	1.255,7	-257	576,7	801,2	454,6	197,6
Pirapora	1.101,7	1.267,6	-165,8	600,0	842,0	425,7	259,7
Salinas	832,3	1.149,4	-317,1	549,7	777,4	372,1	54,9

Tabela 5 - Balanço Hídrico Climatológico (BHC) para as estações analisadas. A seção 1 corresponde do BHC da Normal Climatológica 1981-2010 com evapotranspiração potencial (ET_p) estimada por Penman-Monteith. As seções restantes (2, 3, 4 e 5) correspondem ao BHC do período de dados de cada estação com ET_p estimada por método. São apresentados dados de Precipitação (P), Excesso (valores positivos) ou Escassez (valores negativos) de Precipitação ($P - ET_p$), Armazenamento do solo (ARM), Evapotranspiração Real (ET_R), Deficiência (DEF) e Excedente (EXC) Hídrico. Todos os valores são apresentados em $mm \cdot ano^{-1}$. (Conclusão)

Estação	P	ET_p	$P - ET_p$	ARM	ET_R	DEF	EXC
5 – Thornthwaite							
Diamantina	1.368,5	846,9	521,7	834,9	746,5	100,4	622,1
Itamarandiba	1.131,0	930,5	200,5	722,2	770,7	159,8	360,3
Janaúba	784,5	1.385,4	-600,9	340	784,5	600,9	0
Januária	924,9	1.317,8	-392,9	556,2	795	522,8	129,9
Mocambinho	876,1	1.363,5	-487,4	460,9	867,2	496,4	8,9
Montes Claros	998,7	1.180,8	-182,1	590,6	824,6	356,2	174,2
Pirapora	1.101,7	1.292,0	-190,3	577,4	911,6	380,4	190,1
Salinas	832,3	1.234,1	-401,8	474,2	826,0	408,1	6,31

Nota-se, na Tabela 5, que o método de Penman-Monteith apresentou, para o período estudado, valores bem próximos ao da Normal Climatológica, o que indicar que o comportamento se manteve. Hargreaves & Samani superestimou valores de ET_P , ET_R (com exceção de Salinas) e DEF, e subestimou ARM e EXC . Makkink superestimou ARM e EXC , mas subestimou ET_P (com exceção de Janaúba), ET_R e DEF (com exceção de Janaúba). Thornthwaite subestima ET_P (com exceção de Janaúba), ET_R (com exceção de Janaúba). DEF e superestima ARM (com exceção de Janaúba) e EXC (com exceção de Janaúba).

As estações Janaúba e Salinas não apresentaram volume de EXC para o método de Penman-Monteith. Mocambinho não apresentou EXC nem no BHC da Normal Climatológica nem no BHC Penman-Monteith. O BHC de Hargreaves & Samani acrescentou Januária com ausência de EXC , enquanto com Makkink não apresentou qualquer ausência de EXC . Thornthwaite expressa que somente em Janaúba não houve EXC de água no solo nulo.

Ao analisar os valores de ET_P pode-se concluir que os métodos de Makkink e Thornthwaite subestimam os valores anuais de Penman-Monteith, enquanto Hargreaves & Samani superestima.

Barros (2010) estudou o comportamento climatológico da mesorregião Norte de Minas para o período de 1961 a 2006. Os valores de ET_P foram calculados pelo método de Thornthwaite. O valor máximo encontrado para DEF em Janaúba (27 anos), Januária (45 anos), Montes Claros (45 anos), Pirapora (27 anos) e Salinas (30 anos) foram próximos a 98 mm, 102 mm, 70 mm, 80 mm e 80 mm, respectivamente no mês de setembro. Os valores máximos encontrados no presente trabalho foram iguais a 105,87 mm (36 anos), 104,88 mm (40 anos), 78,99 mm (38 anos), 89,94 mm (33 anos), e 88,31 mm (40 anos), respectivamente para o mesmo mês. A diferença entre os valores encontrados se deve a diferença no volume de dados utilizados pelos autores e a não inclusão de anos mais secos, como 2012 a 2015 por Barros (2010).

Santos et al. (2019) analisaram o comportamento climatológico da mesorregião Norte de Minas para o período de 1985 a 2016 e realizou o BHC com ET_P calculada por Penman-Monteith. Os valores máximos de DEF para Mocambinho (26 anos), Januária (28 anos), Janaúba (30 anos), Salinas (31 anos), Montes Claros (27 anos) e Pirapora (31 anos) foram próximos a 149 mm, 180 mm, 150 mm, 130 mm, 150 mm, e 140 mm, respectivamente para o mês de setembro. Neste trabalho foram encontrados os seguintes valores máximos de DEF: 138,57 mm (30 anos), 145,44 mm (40 anos), 128,06 mm (36 anos), 120,04 mm (40 anos),

120,78 mm (38 anos) e 124,67 mm (33 anos), respectivamente para o mês de setembro. A diferença entre os valores encontrados se deve exclusivamente a diferença no volume de dados utilizados pelos autores.

Ambos trabalhos expressam o valor anual de P, ET_P , ET_R , DEF e EXC, e podem ser conferidos na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Relação anual de valores de Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ET_p), Déficit (DEF) e Excedente (EXC) Hídrico disponíveis nos trabalhos de Barros (2010) e Santos et al. (2019). Todos os valores estão em mm.ano⁻¹.

Estações	Estudo - Thornthwaite				Estudo - Penman-Monteith				Barros (2010) - Thornthwaite				Santos et al. (2019) - Penman-Monteith			
	P	ET _p	DEF	EXC	P	ET _p	DEF	EXC	P	ET _p	DEF	EXC	P	ET _p	DEF	EXC
Diamantina	1.368,6	846,9	100,4	622,1	1.368,6	1.194,4	256,6	430,7	1.407,7	818,67	-	-	-	-	-	-
Itamarandiba	1.131	930,5	159,8	360,3	1.131	1.197,2	297,5	231,3	1.081,1	925,3	-	-	-	-	-	-
Janaúba	784,5	1.385,4	600,9	0	784,5	1.549,9	765,4	0	840,7	1.390,9	577,9	27,7	734	1.671	938	-
Januária	924,9	1.317,8	522,8	129,9	924,9	1.611,5	722,3	35,7	961,4	1.363,4	494,4	92,4	942	1.782	891	52
Mocambinho	876,1	1.363,5	496,4	8,9	876,1	1.591	714,9	0	-	-	-	-	830	1.599	769	-
Montes Claros	998,8	1.180,8	356,2	174,2	998,8	1.492,7	613	119	1.082,4	1.195,5	338,8	225,7	1.015	1.670	770	115
Pirapora	1.101,7	1.292	380,4	190,1	1.101,7	1.527,1	594,6	169,2	1.134,6	1.363,7	421,8	1.92,7	1.060	1.593	684	151
Salinas	832,3	1.234,1	408,1	6,3	832,3	1.435,2	603	0	877,6	1.258,2	396	15,4	830	1.528	698	1

Fonte: Barros (2010); Santos et al. (2019).

Ao comparar os dados da Tabela 6 com os da Tabela 5 pode-se afirmar que a diferença entre os dados se dá pela diferença entre a quantidade de dados envolvida nos cálculos tanto da ET_p quanto dos demais itens do BHC. O grande volume de dados acaba camuflando episódios extremos, ao passo que em volumes pequenos de dados a sua influência fica mais perceptível.

4 CONCLUSÃO

O método de estimativa de evapotranspiração por radiação solar, Makkink, obteve o melhor desempenho quando comparado ao método Hargreaves & Samani, caracterizado por unir radiação solar no topo da atmosfera e temperatura. Dentre os métodos de estimativa diária de evapotranspiração, recomenda-se utilizar o método desenvolvido por Makkink, quando houver limitação de dados para o uso do método Penman-Monteith, pois foi o método diário que obteve melhor desempenho.

A comparação entre o índice pluviométrico mensal para a série histórica utilizada no estudo com o valor na Normal Climatológica 1981-2010 tornou possível a identificação de anos com baixos índices pluviométricos. A região estudada possui estação seca entre abril e setembro, sendo esperado que esse período tenha precipitações baixas. Destaca-se os meses de junho a agosto como os meses com a maior quantidade de anos com pluviosidade inferior à da Normal Climatológica.

O BHC da Normal Climatológica 1981-2010 serviu de guia para avaliar o BHC da série histórica com a ET_o obtida pelos métodos de estimativa Penman-Monteith, Hargreaves & Samani, Makkink e Thornthwaite. O método Makkink pode não ser adequado para a avaliação do BHC, pois subestima os valores de ET_p , ET_r , DEF, EXC e ARM , ao mesmo passo que Hargreaves & Samani superestima ambos valores. Assim, de posse dos dados trabalhos, sugere-se o emprego dos métodos alternativos ao Penman-Monteith apenas para tomadas de decisão que não dependem de exatidão.

O extrato do BHC de ambas estações expõe os valores de DEF e EXC para cada método de ET_p empregado. Com a análise gráfico-numérica pode-se destacar o mês de setembro como o ápice da deficiência hídrica, sendo essa de maior ocorrência em todas as estações, característica de um clima mais seco no outono/verão. A partir dessas contatações pode-se inferir que setores agrícolas e abastecimento público são os mais afetados, sendo ainda destaque a agricultura de subsistência a mais afetada. O desenvolvimento do estudo permitiu caracterizar o comportamento hidroclimatológico das mesorregiões do Jequitinhonha e do Norte de Minas, notável pela presença majoritária de déficit hídrico e pela baixa pluviosidade anual.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Paulo Emílio Pereira de. **Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 24 p. (Embrapa. Circular técnica, 136).

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage, 56)

ALLEN, R. G.; LI, G. Z. **REF-ET calculation software for FAO and ASCE standardized equations**. Moscow: University of Idaho, 2016. 92p

ÁVILA, L. F. *et al.* Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 247–256, 2014.

BARROS, K. O. **Índice de aridez como indicador da susceptibilidade à desertificação na Mesorregião Norte de Minas**. Monografia (Conclusão de Curso – Bacharel em Geografia). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2010, 89p.

BUDYKO, M. I. **Climate and life**. New York: Academic Press, 1974.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CURI, N. *et al.* Problemas relativos ao uso, manejo e conservação do solo em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 16, n. 176, p. 5–16, 1992.

FLUMIGNAN, D. L. *et al.* **Evapotranspiração de Referência (ET₀) na Região de Dourados, Mato Grosso do Sul** **Comunicado Técnico**, 215, 2016.

GAO, F. *et al.* Evaluation of Reference Evapotranspiration Methods in Arid, Semiarid, and Humid Regions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 4, p. 791–808, 2017.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. DE. Alternative methods of reference evapotranspiration for Brazilian climate types. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 567–578, 2018.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v.1, p.96–99, 1985.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da População**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 01 jun. 2020.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Brasília, DF: INMET, 2017.

_____. **Normais Climatológicas do Brasil, 1981- 2010**. Brasília: INMET, 2018.

LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, v. 18, p. 409-424, 1977.

MAKKINK, G.F. Testing the Penman formula by means of lysimeters, **J. Inst. Water Eng.**, v.11, p.277–288, 1957.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais : Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, p. 129–156, 2018.

NOIA, C. P. Z. *et al.* Evapotranspiração de referência estimada pelos métodos Penman–Monteith-FAO (56) e Hargreaves & Samani para o município de Dourados, MS. **Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 300–308, 2014.

OLIVEIRA, J. Â. M. DE; OLIVEIRA, C. M. M. DE. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Arinos – MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 6, p. 3021–3027, 2019.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v. 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, R. H. M.; GONCALVES, C. N. **geobr: Loads Shapefiles of Official Spatial Data Sets of Brazil**, 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=geobr>>.

PINHO, V. N. **Estudo das características hidroclimatológicas no município de Janaúba e método de estimativa de contribuição da precipitação na barragem do município**. Monografia (Conclusão de Curso – Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2014.

PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters, *Mon. Weather Rev.* v.100, n.2, p.81–92, 1972.

REBOITA, M. S. *et al.* Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206–226, 2015.

SANTOS, R. A. DOS; MARTINS, D. L.; SANTOS, R. L. Balanço hídrico e classificação climática de Köppen e Thornthwaite no município de Feira de Santana (BA). **Geo UERJ**, n. 33, 2018.

SANTOS, T. A. *et al.* Zonas homogêneas de evapotranspiração de referência para o norte e noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 4, p. 3540–3555, 25 mar. 2019.

SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. DOS; MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 3, p. 28–42, dez. 2008.

SHIRMOHAMMADI-ALIAKBARKHANI, Z.; SABERALI, S. F. Evaluating of eight evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran. **Agricultural Water Management**, v. 239, n. January, p. 106243, 2020.

SILVA, G. H. DA *et al.* Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 83–89, 2018.

SILVA, M. M.; FERREIRA, V. O. Pluviometria e balanço hídrico da bacia do rio Paranaíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, n. 05, p. 1335–1346, 2015.

SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2020. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 27/07/2020.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55, jan. 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1)

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. **Publications in Climatology**, v. 10, p. 185–311, 1957.

TURC, L. Estimation of Irrigation Water Requirements, Potential Evapotranspiration: A Simple Climatic Formula Evolved up to Date. *Ann. Agronom.* 12, 13-14, 1961.

VALLE JÚNIOR, L. C. G. *et al.* Comparative assessment of modelled and empirical reference evapotranspiration methods for a brazilian savanna. **Agricultural Water Management**, v. 232, n. February, p. 106040, 2020.

VIRGENS FILHO, J. S. *et al.* **Pgeclima_r: gerador estocástico para simulação de cenários climáticos brasileiros. I - desenvolvimento do gerenciador do banco de dados climáticos.** XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Anais..., 2011.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.** Springer-Verlag: New York, 2020. Disponível em: <<https://ggplot2.tidyverse.org>>.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; MINTZ, Y. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, p. 589–606, 1985.

WILLMOTT, C. J. **Some comments on evaluation of model performance**, *Bulletin of American Meteorological Society*, Boston, v.63, p. 1309-1313, 1982.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. **hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series**, 2020. Disponível em: <<https://github.com/hzambran/hydroGOF>>