

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

Tarlei Aparecido Santos¹, Marcelo Rossi Vicente², Caio Vinicius Leite³, Ronaldo Medeiros dos Santos⁴, José Luís Teixeira de Souza⁵

RESUMO

Considerando a importância econômica da produção irrigada para as regiões Noroeste e Norte do Estado de Minas Gerais e a importância do uso racional da água para manutenção da agricultura irrigada, este trabalho teve como objetivo mapear zonas homogêneas de evapotranspiração de referência (ET_0) nas mesorregiões supracitadas. Foi utilizada a rede de estações meteorológicas convencionais, situadas dentro e ao redor da área de estudo, totalizando 34 estações utilizadas. Os dados meteorológicos, necessários para o zoneamento, foram obtidos de uma série histórica de 32 anos (1985-2016). Foram estimados os valores médios de ET_0 pelo método de Penman-Monteith – FAO e o Balanço Hídrico Climatológico (BHC). O método utilizado para interpolação dos dados foi do tipo Krigagem ordinária. Para a validação das zonas homogêneas, foram aplicados diferentes indicadores estatísticos, que correlacionaram os dados observados com os dados estimados. Com base no BHC, foram considerados críticos os meses de julho, agosto, setembro e outubro. Foram identificadas 5 zonas homogêneas de ET_0 . As médias de ET_0 previstas pela Krigagem ordinária foram similares às observadas (medidas) pelas estações meteorológicas convencionais, uma vez que os indicadores estatísticos se mostraram satisfatórios.

Palavras-chave: krigagem ordinária, geoestatística, irrigação.

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ZONES FOR THE NORTH AND NORTHWEST REGIONS OF THE MINAS GERAIS STATE

¹ Engenheiro Florestal, Mestrando em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife, Recife, PE. E-mail: tarleyengflorestal@gmail.com

² Engenheiro Agrônomo, Doutor, Docente do Instituto Federal do Norte de Minas – Campus Salinas, Salinas, MG. E-mail: marcelo.vicente@ifnmg.edu.br

³ Engenheiro Agrícola e Ambiental, Mestre, Docente do Instituto Federal de Brasília - Campus Planaltina, Planaltina, DF. E-mail: caio.leite@ifb.edu.br

⁴ Engenheiro Agrimensor, Doutor, Docente do Instituto Federal do Norte de Minas – Campus Salinas, Salinas, MG. E-mail: ronaldo.medeiros@ifnmg.edu.br

⁵ Graduando em Engenharia Florestal, Bolsista PIBIC CNPq, Instituto Federal do Norte de Minas – Campus Salinas, Salinas, MG. E-mail: jose.engeflor@gmail.com

ABSTRACT

Considering the economic importance of irrigated crop production for the Northwest and North regions of Minas Gerais State and the relevance of the rational water use for maintenance of irrigated agriculture, this work aimed to map homogeneous zones of reference evapotranspiration (ET_0) at those regions. The weather stations network around the study area was composed by 34 stations and the data were obtained through the BDMEP / INMET system platform, from a 32-year historical series (1985-2016). The mean ET_0 values were estimated using the FAO Penman-Monteith method and the water balance. The ordinary kriging technique was used for data interpolation. Different statistical indicators were applied to validate the homogeneous zones, correlating the observed data with the estimated one. July, August, September and October were considered critical months to the water balance. Five homogeneous ET_0 zones were identified and the ET_0 averages predicted by ordinary kriging were similar to those observed (measured) by the weather stations, once the statistical indicators were satisfactory.

Keywords: ordinary kriging, geostatistics, irrigation.

INTRODUÇÃO

Diante do aumento crescente da escassez hídrica que vem ocorrendo em várias regiões do mundo, a quantificação da evapotranspiração é de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada (VICENTE et al., 2015).

A evapotranspiração tem grande influência na perda de água nas bacias hidrográficas e está estreitamente relacionada com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e ao escoamento superficial. Portanto o entendimento das variações da evapotranspiração é de grande relevância em estudos hidrológicos regionais (LIANG et al., 2009). Também desempenha um importante papel na gestão de bacias hidrográficas, no manejo da agricultura irrigada e em estudos relacionados a modelagem meteorológica e hidrológica (BEZERRA et al., 2008).

Controlada pelo balanço de energia, a evapotranspiração depende da demanda atmosférica, da disponibilidade de água presente no solo e das características fisiológicas das plantas (SANCHES et al., 2015). A evapotranspiração pode ser medida diretamente ou estimada por modelos físico-matemáticos ou empíricos.

O método de Penman-Monteith-FAO é o mais utilizado no mundo para estimar a ET_0 (PEREIRA et al., 2015). Esse método requer

uma quantidade expressiva de variáveis climáticas, o que pode dificultar a sua utilização por pequenos e médios produtores agrícolas, que não dispõe das informações meteorológicas e pelo elevado custo de aquisição de estações meteorológicas (VICENTE et al., 2014). Diante de tais limitações, a disponibilização da distribuição espacial mensal da ET_0 se apresenta como uma alternativa viável, que possibilitaria aos irrigantes, pequenos e médios, uma informação prontamente utilizável para o uso mais eficiente da irrigação e, conseqüentemente, de água e energia (SILVA JUNIOR, 2017).

Como o INMET opera aproximadamente 900 estações de superfície, dentre convencionais e automáticas (VIANELLO; ALVES, 2012), o uso de ferramentas geostatísticas para a espacialização de dados climáticos é uma alternativa que pode proporcionar maior acesso às informações de ET_0 pelos irrigantes e usuários em geral.

Um dos principais métodos de interpolação de dados é a krigagem ordinária, que usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do espaço analisado, ao qual o modelo do semivariograma foi ajustado, sem tendência e com variância mínima (MOTOMIYA et al., 2006).

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

Mancosu et al. (2014), analisando três técnicas de interpolação, quando estabeleceram procedimentos para o desenvolvimento de mapas de zonas de evapotranspiração de referência, indicaram a krigagem como a melhor para a espacialização da ET_0 .

Vila Nova et al. (2012), realizaram um estudo que avaliava a qualidade dos valores de ET_0 médios mensais interpolados geoespacialmente a partir do processo de krigagem, no Sul de Minas Gerais, por meio do qual constataram que o referido método pode ser aplicado para elaboração de mapas de ET_0 em regiões com escassez de dados hidrometeorológicos, desde que os procedimentos para seleção das estações meteorológicas utilizadas e validação dos resultados sejam considerados.

Já Silva Junior (2017), utilizando a krigagem, realizou o mapeamento de zonas homogêneas de evapotranspiração de referência para região Noroeste Paulista, como ferramenta para o manejo sustentável da irrigação.

Na Califórnia, EUA, destaca-se o Sistema de Informação de Manejo da Irrigação da Califórnia (*California Irrigation Management Information System - CIMIS*),

desenvolvido pelo Departamento de Recursos Hídricos da Califórnia (*California Department of Water Resources - DWR*) e pela Universidade da Califórnia, que gerencia uma rede de mais de 145 estações meteorológicas automáticas em 18 zonas homogêneas de evapotranspiração de referência.

Diante do exposto, o trabalho teve por objetivo mapear zonas homogêneas de evapotranspiração de referência (ET_0) nas mesorregiões do Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais, como forma de disponibilizar aos irrigantes da região uma informação imprescindível à gestão eficiente dos recursos hídricos, energéticos e financeiros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreendeu as mesorregiões do Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais, conforme ilustrado na Figura 1. Juntas, essas compreendem uma superfície de aproximadamente 190.801 km², situada entre os paralelos 14° e 19° de latitude sul e entre os meridianos 47° e 41° a oeste de Greenwich.

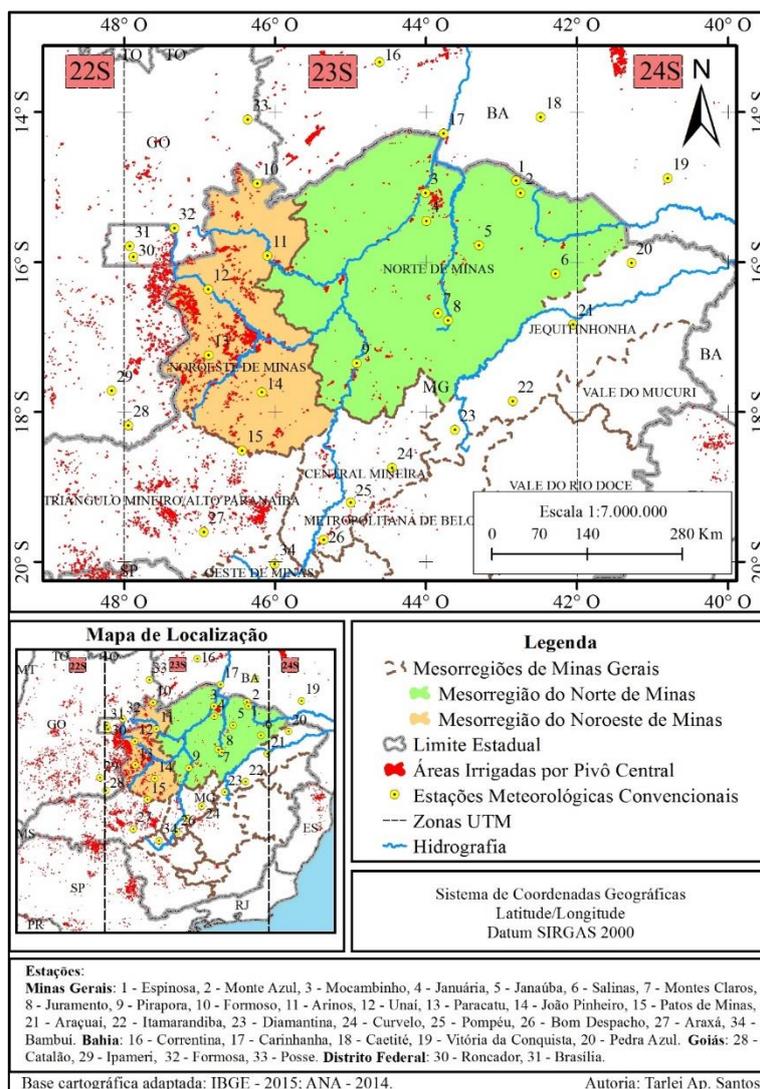


Figura 1. Mapa de Localização da mesorregião do Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais. Fonte: Adaptado da base cartográfica IBGE, 2015 (Divisão das mesorregiões e microrregiões do Brasil) e da base cartográfica ANA, 2014 (Áreas irrigadas por pivô central no Brasil em 2014).

A mesorregião do Norte de Minas Gerais é composta por sete microrregiões: Bocaiúva, Grão Mogol, Janaúba, Januária, Montes Claros, Salinas e Pirapora. Abrange 89 municípios e ocupa uma área de aproximadamente 128.451 km², com temperatura média anual de 24,08 °C e precipitação média anual de 900 mm (INMET, 2018). Já a mesorregião do Noroeste de Minas Gerais é formada por duas microrregiões: Unaí e Paracatu, com uma área aproximada de 62.351 Km², abrangendo 19 municípios. Possui temperatura e precipitação anual média de 23,92 °C e 1334 mm, respectivamente (INMET, 2018).

Foi utilizada uma rede de estações meteorológicas localizadas dentro da área de interesse, composta por 14 estações convencionais; todas sob administração do INMET, sendo cinco estações localizadas na mesorregião Noroeste e nove estações localizadas na mesorregião Norte. Ademais, foram selecionadas no entorno da área de interesse outras 21 estações, com o intuito de se minimizar o efeito de borda. Neste caso, foram selecionadas estações nos estados da Bahia (4), Goiás (4), no Distrito Federal (2) e 11 estações no estado de Minas Gerais, entre o oeste e o sul da área de interesse. No total, foram utilizadas 35 estações (Figura 1).

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

Rede das Estações Meteorológicas

Os dados meteorológicos necessários para o mapeamento das zonas homogêneas ET_0 foram obtidos através da plataforma do sistema BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) (INMET, 2017). Foram obtidas informações de uma série histórica de 32 anos (1985-2016), em uma escala mensal, que continha informações sobre: velocidade média do vento; insolação total; precipitação total; temperatura máxima média; temperatura mínima média e; umidade relativa média.

Evapotranspiração de referência e balanço hídrico climatológico (BHC)

A partir das variáveis meteorológicas, foi estimada a evapotranspiração de referência (ET_0), em escala mensal, pela metodologia proposta por Penman-Monteith - FAO (ALLEN et al., 1998). O método utilizado para calcular o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) foi o proposto por Thornthwaite e Mather (1955), com o auxílio da ferramenta “BHnorm”, elaborado em planilha por Rolim et al. (1998). Para a estimativa do BHC foram necessárias as variáveis de evapotranspiração de referência (ET_0), precipitação e capacidade de água disponível no solo (CAD). No caso desta última, adotou-se um valor de referência de 100 mm, conforme recomendado por Vianello e Alves (2012).

O BHC identificou os meses mais críticos para o manejo da irrigação, a partir dos quais foi possível identificar e zonestar as áreas homogêneas quanto à distribuição da ET_0 .

Procedimentos para elaboração dos mapas climáticos

A base cartográfica foi obtida gratuitamente no formato shapefile (.shp), compreendendo os mapas temáticos vetoriais das meso e microrregiões do Norte e Noroeste de Minas Gerais, além dos limites municipais e estaduais das unidades da federação disponibilizada no site do IBGE na escala 1:1.000.000. A base hidrográfica e a área de pivôs centrais de irrigação, para ano de 2014,

foram obtidas através do site da Agência Nacional de Águas (ANA) na escala 1:1.000.000 e 1:250.000, respectivamente (ANA; EMBRAPA, 2016).

Utilizou-se *softwares* livres de sistema de informação geográfica para organização/gerenciamento dos dados geográficos. Da base cartográfica, foram selecionados apenas os dados contidos dentro da área de interesse, para o estabelecimento do mapa base para interpolação dos resultados. Para a modelagem dos semivariogramas experimentais foi utilizado o *software* GS⁺ (Gamma Design Software, 2016), versão “Demo”.

Método de interpolação e ajuste de modelos à semivariogramas experimentais

O método utilizado para interpolação dos dados foi a Krigagem ordinária, uma vez que a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado (PIRES et al., 2016). Utilizou-se o *software* GS⁺, versão Demo, para o ajuste automático de modelos teóricos a semivariogramas experimentais dos dados.

O *software* possui como critério para avaliar o melhor ajuste, o valor do coeficiente de determinação (R^2) e o menor valor para soma de quadrados de resíduos (SQres). Ajustando-se as informações para o tipo (exponencial, linear, esférico, gaussiano) e os parâmetros (alcance da dependência espacial, efeito pepita, distância entre o efeito pepita e o patamar) do modelo de semivariograma, foram transferidos, para o *software* livre de sistema de informação geográfica, os resultados, a partir dos quais foram interpoladas as variáveis e elaborados os mapas de distribuição espacial da ET_0 na área de estudo.

Interpolação e definição das zonas homogêneas

Para interpolação dos dados, o procedimento utilizado foi o mesmo adotado por Silva Junior (2017), onde no *software* livre de sistema de informação geográfica, através de ferramentas de geoestatística,

selecionaram-se as opções krigagem ordinária e modelo Gaussiano para o ajuste de semivariogramas experimentais. Ao final, separaram-se as classes de ET_0 em intervalos padronizados de $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$.

As zonas homogêneas de ET_0 foram definidas a partir dos resultados obtidos do balanço hídrico climatológico, onde os meses que registraram os maiores valores de déficit hídrico (mais críticos para o manejo da irrigação) serviram como referência para determinação das zonas homogêneas, conforme Silva Junior et al. (2018). A interseção das classes de ET_0 , padronizadas em intervalos de $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$, para os meses mais críticos, permitiu a visualização das áreas equivalentes. A partir da identificação das áreas equivalentes, foram desenhados semi-automaticamente os polígonos que caracterizaram as zonas homogêneas.

Validação das Zonas Homogêneas

Para a validação das zonas homogêneas, foram utilizados diferentes indicadores

estatísticos que correlacionaram os valores mensais de ET_0 (mm dia^{-1}) observados pelas 14 estações meteorológicas convencionais, localizadas dentro da área de interesse, com os valores médios mensais de ET_0 (mm dia^{-1}), estimados com base na média de cada zona homogênea predita pela Krigagem ordinária, conforme a metodologia proposta por Castro et al. (2010).

Os indicadores utilizados para a validação das zonas homogêneas de ET_0 foram: o coeficiente de correlação de Pearson (r); o coeficiente de determinação (R^2); a raiz do erro médio quadrático (REMQ); o índice de concordância (d) de Willmott (1981); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970); o erro médio absoluto (EMA); e o erro médio percentual (EMP) e o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

Os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao índice de confiança, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança.

Valor de c	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,4$	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Foi comparado, dentro de cada zona homogênea, o valor médio de ET_0 , obtido a partir dos dados medidos nas estações com os valores de ET_0 preditos via interpolação por Krigagem.

Após a validação do mapa que representou as zonas homogêneas, foi construída uma tabela relativa aos valores médios mensais ET_0 para cada zona.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evapotranspiração e Balanço Hídrico Climatológico

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios diários de ET_0 . Observa-se que a demanda evapotranspirométrica reduziu continuamente entre os meses de janeiro e junho, quando atingiram os menores valores e, posteriormente, aumentou progressivamente até atingir os maiores valores em outubro. Essa tendência é observada em todas as estações do Norte e Noroeste de Minas.

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

Tabela 2. Médias da evapotranspiração de referência (ET_0), calculadas pelo método de Penman-Monteith – FAO.

Estações	ET_0 (mm dia ⁻¹)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Espinosa - MG	4,84	5,51	5,04	4,84	4,51	4,44	4,68	6,00	6,71	6,70	5,13	4,93	5,28
Monte Azul - MG	4,94	5,31	4,90	4,83	4,50	4,43	4,73	5,69	6,48	6,37	5,08	4,62	5,16
Mocambinho - MG	4,39	4,70	4,42	4,42	3,91	3,68	3,84	4,31	5,09	5,15	4,49	4,21	4,38
Januária - MG	4,67	5,11	4,62	4,55	4,09	3,92	4,38	5,39	6,27	6,34	4,75	4,48	4,88
Janaúba - MG	4,61	5,25	4,63	4,54	4,09	3,86	3,99	4,82	5,26	5,27	4,48	4,20	4,58
Salinas - MG	4,55	4,99	4,36	3,79	3,19	2,93	3,29	4,19	4,98	5,33	4,36	4,33	4,19
Montes Claros - MG	4,80	5,17	4,56	4,27	3,74	3,46	3,79	4,81	5,66	5,64	4,65	4,40	4,58
Juramento - MG	4,39	4,69	4,10	3,78	3,29	3,05	3,15	4,10	4,86	5,01	4,31	4,06	4,07
Pirapora - MG	4,51	4,89	4,27	4,16	3,49	3,18	3,42	4,46	5,45	5,61	4,63	4,37	4,37
Formoso - MG	4,16	4,46	4,13	4,10	3,88	3,68	4,03	4,74	5,22	5,18	4,08	3,87	4,30
Arinos - MG	3,92	4,08	3,73	3,50	3,01	2,75	3,16	3,76	4,35	4,49	3,83	3,55	3,68
Unai - MG	4,12	4,06	3,74	3,50	3,08	2,89	3,14	3,89	4,68	4,77	3,87	3,54	3,77
Paracatu - MG	4,34	4,58	4,10	3,89	3,40	3,17	3,62	4,59	5,36	5,35	4,49	4,19	4,26
João Pinheiro - MG	3,86	4,33	3,97	3,83	3,35	3,10	3,39	4,00	4,42	4,49	4,04	3,87	3,89

Analisando o resultado anual do BHC das estações estudadas (Tabela 3), observa-se que Espinosa, Monte Azul e Janaúba, todas no Norte de Minas, apresentaram os menores valores acumulados de chuvas (667 mm, 734

mm e 734 mm, respectivamente) e maiores déficit hídricos (1.258 mm, 1.148 mm e 938 mm, respectivamente), o que dificulta a prática da agricultura de sequeiro.

Tabela 3. Resumo anual dos parâmetros precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_0), déficit hídrico (DEF) e excedente hídrico (EXC) para as regiões Norte e Noroeste de Minas Gerais.

Estações	P (mm)	ET_0 (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Espinosa - MG	667	1.925	1.258	-
Monte Azul - MG	734	1.882	1.148	-
Mocambinho - MG	830	1.599	769	-
Januária - MG	942	1.782	891	52
Janaúba - MG	734	1.671	938	-
Salinas - MG	830	1.528	698	1
Montes Claros - MG	1.015	1.670	770	115
Juramento - MG	902	1.482	626	45
Pirapora - MG	1.060	1.593	684	151
Formoso - MG	1.224	1.568	613	270
Arinos - MG	1.116	1.341	493	268
Unai - MG	1.341	1.376	445	409
Paracatu - MG	1.421	1.553	575	443
João Pinheiro - MG	1.338	1.418	496	416

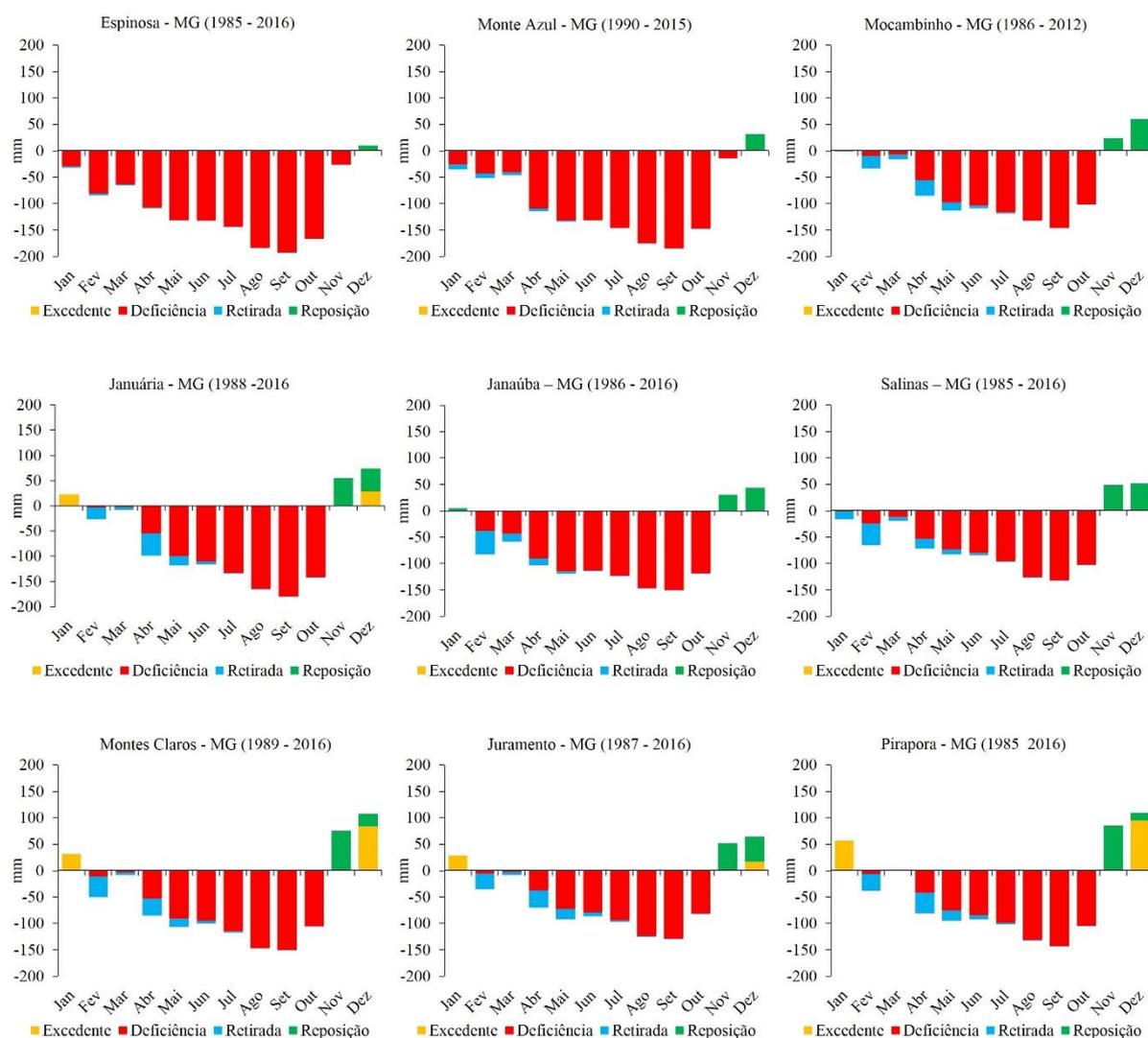
As estações localizadas na mesorregião do Norte de Minas Gerais apresentaram os maiores valores de deficiência hídrica (média de 865 mm ano⁻¹) e de demanda

evapotranspirométricas (média de 1.599 mm ano⁻¹). Os menores valores, por sua vez, ocorreram nas estações localizadas na mesorregião do Noroeste de Minas Gerais;

com média de 524 mm ano⁻¹ para a deficiência hídrica e de 1.451 mm ano⁻¹ para a demanda evapotranspirométrica. As estações dessa mesorregião também apresentaram as maiores taxas de precipitação (média de 1.288 mm ano⁻¹). A mesorregião Noroeste de Minas apresentou melhores condições climáticas para o desenvolvimento da agricultura de sequeiro, comparada à mesorregião do Norte de Minas.

Analisando o balanço hídrico climatológico (Figura 2), observou-se que os

meses de julho, agosto, setembro e outubro foram os mais críticos para o manejo da irrigação, por apresentarem os maiores valores de ET₀ e deficiência hídrica (Figura 2). A identificação dos meses de deficiência hídrica mais acentuada (julho, agosto, setembro e outubro) serviu de base para o zoneamento das zonas homogêneas de evapotranspiração de referência.



ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

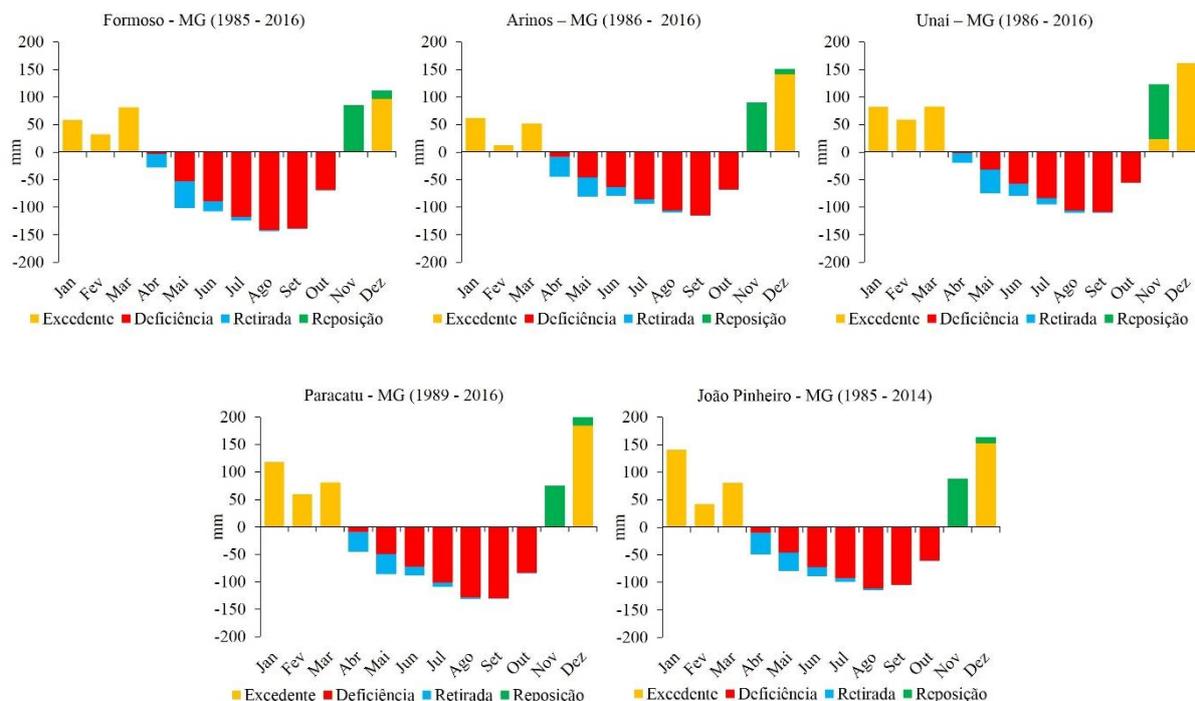


Figura 2. Balanço Hídrico Climatológico (BHC), para o período de 1985 a 2016, utilizando os dados da rede estações meteorológicas convencionais do INMET, para a região Norte e Noroeste, do estado de Minas Gerais.

Distribuição espacial da ET_0

Os ajustes dos modelos dos semivariogramas experimentais, para interpolação de dados da ET_0 por Krigagem ordinária, foram do tipo Gaussiano, adotando-se como critério de escolha os melhores valores dos índices estatísticos “Coeficiente de determinação” (R^2) e “soma de quadrados de resíduos” (SQres).

Na Figura 3 observa-se a distribuição espacial da ET_0 . Observa-se que a demanda evapotranspirométrica reduz continuamente entre meses de janeiro e junho, quando atinge o menor valor da ET_0 (média de $3,35 \text{ mm dia}^{-1}$) e, posteriormente, aumenta progressivamente até atingir o maior valor em outubro (média de $5,35 \text{ mm dia}^{-1}$).

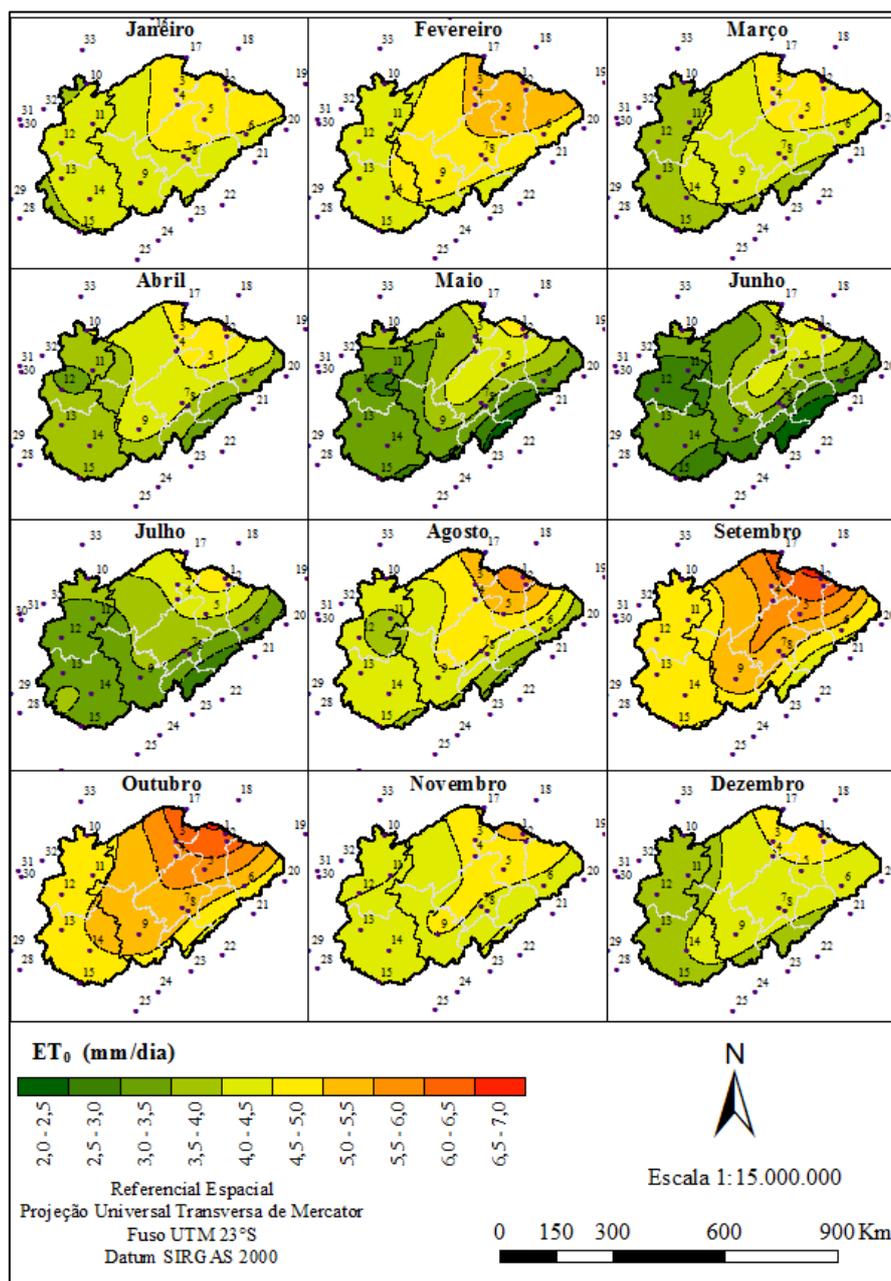


Figura 3. Distribuição espacial de ET_0 para a mesorregião do Norte e Noroeste, do estado de Minas Gerais.

Zonas homogêneas

Os mapas de distribuição espacial de ET_0 , juntamente com o Balanço Hídrico Climatológico, reforçaram a constatação de que os meses de julho, agosto, setembro e outubro são os mais críticos para o manejo da irrigação na região em estudo, pois a medida que a demanda evapotranspirométrica é crescente, as deficiências hídricas são mais elevadas. Silva Junior et al. (2018)

determinaram os meses de agosto, setembro e outubro os meses mais críticos para a agricultura irrigada na região Noroeste de São Paulo.

Os mapas dos meses mais críticos foram sobrepostos para visualização do esboço das zonas homogêneas de evapotranspiração de referência (ET_0), conforme indicado na Figura 4.

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

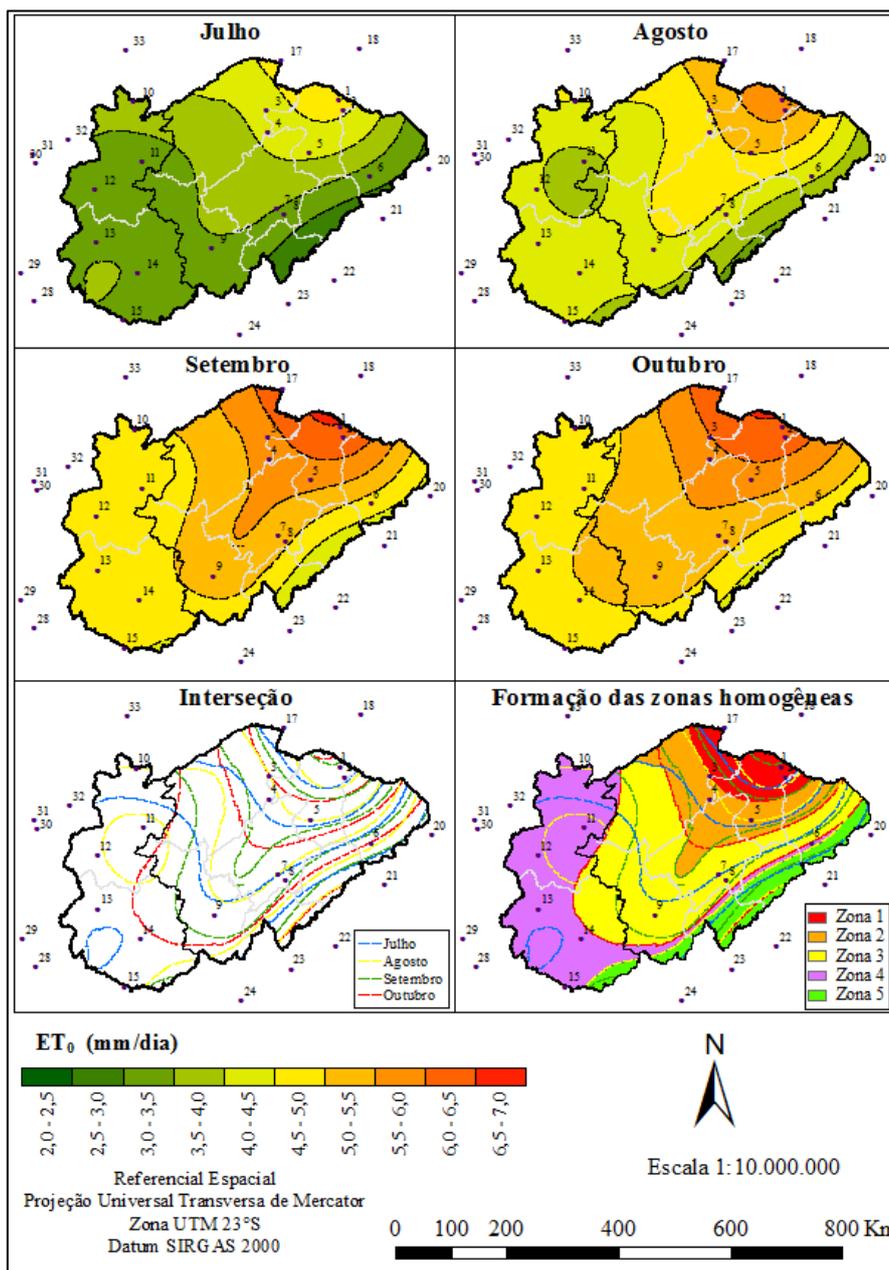


Figura 4. Sobreposição dos mapas para os meses mais críticos para o manejo da irrigação para a mesorregião do Norte e Noroeste, do estado de Minas Gerais.

Foram identificadas cinco zonas homogêneas de ET_0 para as mesorregiões Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais (Figura 5). A região Noroeste foi abrangida por 3 zonas com as menores taxas evapotranspirométricas, enquanto a região

Norte foi caracterizada por todas as zonas, sendo que mais ao norte registraram-se as zonas de maior demanda evapotranspirométrica e ao sul com a diminuição da demanda.

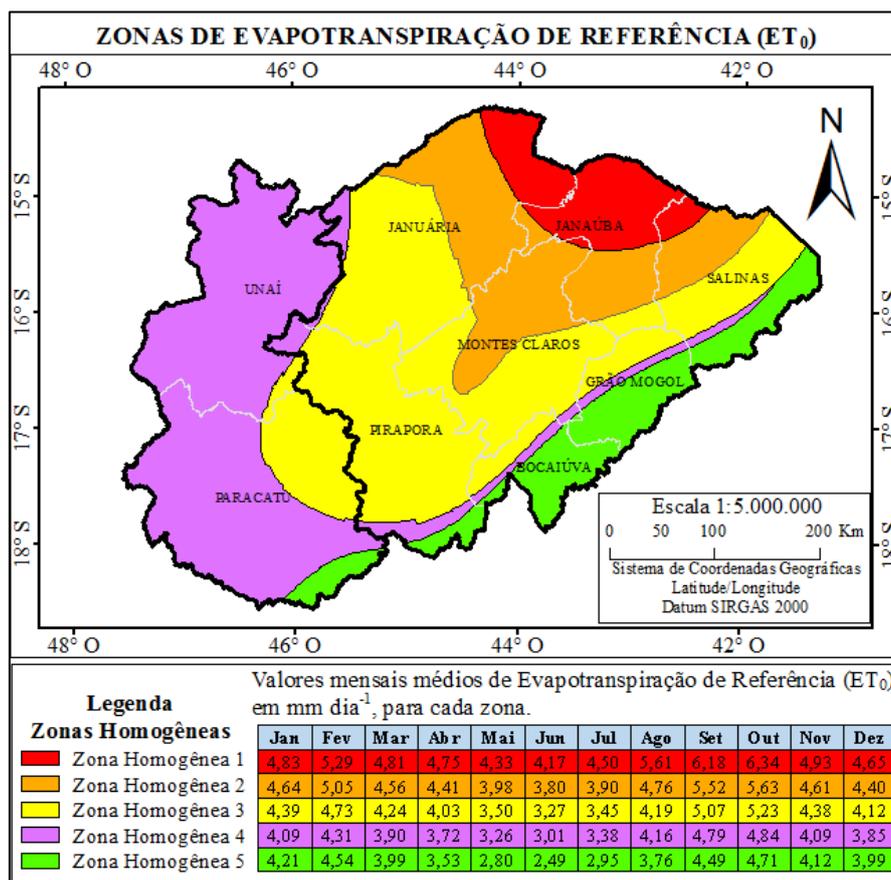


Figura 5. Mapa representativo das Zonas Homogêneas e valores estimados mensais da evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹), para cada zona na mesorregião do Norte e Noroeste, do estado de Minas Gerais.

Os valores médios mensais de ET₀ (mm dia⁻¹), estimados com base na média de cada zona predita pela Krigagem ordinária são apresentados na Tabela 4. Esses valores

médios, estimados com base na série histórica de 32 anos, poderão servir como uma ferramenta auxiliar no manejo racional da irrigação.

Tabela 4. Valores mensais médios de evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹), para cada zona da mesorregião do Norte e Noroeste, do estado de Minas Gerais.

Zona	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Z1	4,83	5,29	4,81	4,75	4,33	4,17	4,50	5,61	6,18	6,34	4,93	4,65
Z2	4,64	5,05	4,56	4,41	3,98	3,80	3,90	4,76	5,52	5,63	4,61	4,40
Z3	4,39	4,73	4,24	4,03	3,50	3,27	3,45	4,19	5,07	5,23	4,38	4,12
Z4	4,09	4,31	3,90	3,72	3,26	3,01	3,38	4,16	4,79	4,84	4,09	3,85
Z5	4,21	4,54	3,99	3,53	2,80	2,49	2,95	3,76	4,49	4,71	4,12	3,99

*Z1 - Zona homogênea 1; Z2 - Zona homogênea 2; Z3 - Zona homogênea 3; Z4 - Zona homogênea 4; Z5 - Zona homogênea 5.

A zona homogênea 1, em termos de área, foi a menor zona identificada. Localizada mais ao norte das mesorregiões do Norte de Minas, abrangeu partes das microrregiões de Janaúba (54%), Januária (15%), Salinas (7%)

e Montes Claros (1%). O menor valor de ET₀ foi observado em junho (média de 4,17 mm dia⁻¹) e o maior valor em outubro (média de 6,34 mm dia⁻¹). Nesta zona homogênea, está inserida a maior parte do projeto público de

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

irrigação de Jaíba. Também foram identificados 189 pivôs centrais, irrigando uma área de aproximadamente 12.850 hectares (ANA; EMBRAPA, 2016).

A zona homogênea 2 apresentou a terceira maior área das zonas identificadas. Localizada ao sul da zona homogênea 1, na mesorregião do Norte de Minas, abrangeu partes das microrregiões de Montes Claros (41%), Januária (33%), Janaúba (38%) e Salinas (27%). Assim como na zona homogênea 1, o mês de junho apresentou o menor valor ET_0 (média de 3,80 mm dia⁻¹) e o mês de outubro, o maior (média de 5,63 mm dia⁻¹). Nesta zona homogênea está inserido o projeto público de irrigação de Gorutuba, Lagoa Grande e parte do Projeto Jaíba. Nesta zona, foram identificados 206 pivôs centrais, irrigando uma área de aproximadamente 12.709 hectares (ANA; EMBRAPA, 2016).

A zona homogênea 3 apresentou a maior área. Abrangeu partes das microrregiões de Pirapora (83%), Montes Claros (57%), Januária (48%), Salinas (38%), Grão Mogol (28%), Bocaiúva (24%), Paracatu (23%), Janaúba (8%) e Unaí (3%). A maior demanda evapotranspirométrica foi observada em outubro (média de 5,23 mm dia⁻¹) e a menor em junho (média de 3,27 mm dia⁻¹). Estão inseridos nesta zona homogênea, o projeto público de irrigação de Pirapora e extensas áreas irrigadas por pivô central nos municípios de São Romão, Jequitaiá, Várzea da Palma e Buritizeiro. Foram identificados 562 pivôs centrais, irrigando uma área de aproximadamente 45.298 hectares (ANA; EMBRAPA, 2016).

A zona homogênea 4 foi a segunda maior zona identificada. Essa se localiza majoritariamente, a oeste da mesorregião

Noroeste. Compreende partes das microrregiões de Unaí (97%), Paracatu (71%), Bocaiúva (11%), Grão Mogol (11%), Pirapora (11%), Januária (4%), Salinas (4%) e Montes Claros (1%). Também nesta zona homogênea, a maior demanda evapotranspirométrica foi observada em outubro (média de 4,84 mm dia⁻¹) e menor em junho (média de 3,01 mm dia⁻¹). Nesta zona homogênea estão inseridas as maiores áreas irrigadas por pivô central, situadas nos municípios de Unaí, Paracatu, Buritis, Formoso, Guarda-Mor, Presidente Olegário, Vazante, Lagamar, Lagoa Grande e João Pinheiro. Foram identificados 2.341 pivôs centrais, irrigando uma área de aproximadamente 170.747 hectares (ANA; EMBRAPA, 2016).

A zona homogênea 5, a segunda menor zona identificada, está localizada ao sul das mesorregiões Norte e Noroeste de Minas, e abrangeu partes das microrregiões de Bocaiúva (65%), Grão Mogol (61%), Salinas (24%), Paracatu (6%), Pirapora (7%). O menor valor de ET_0 foi observado em junho (média de 2,49 mm dia⁻¹) e o maior em outubro (média de 4,71 mm dia⁻¹). Na zona homogênea 5 estão inseridas áreas irrigadas por pivô central situadas nos municípios Bocaiúva e Águas Vermelhas, principalmente. Foram identificados 36 pivôs centrais, irrigando uma área de aproximadamente 2.229 hectares (ANA; EMBRAPA, 2016).

Para a validação das zonas homogêneas, os valores preditos pela Krigagem de ET_0 foram correlacionados com os valores mensais de ET_0 (mm dia⁻¹) observados pelas 14 estações meteorológicas convencionais. Os índices analisados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Indicadores utilizados para a validação das zonas homogêneas de ET_0 a partir dos dados observados e preditos pela Krigagem ordinária, ajustado para o modelo Gaussiano do semivariograma.

Meses	REQM	d	r	c	Desempenho	R ²	EMA	EMP	NSE
Janeiro	0,205	0,8808	0,7990	0,70	Bom	0,6384	0,154	3,508	0,459
Fevereiro	0,273	0,8858	0,8149	0,72	Bom	0,6641	0,211	4,437	0,458
Março	0,208	0,9206	0,8740	0,80	Muito bom	0,7639	0,177	4,195	0,487
Abril	0,181	0,9491	0,9196	0,87	Ótimo	0,8457	0,158	3,963	0,589
Mai	0,221	0,9362	0,9002	0,84	Muito bom	0,8104	0,173	4,781	0,594
Junho	0,240	0,9373	0,9046	0,85	Muito bom	0,8183	0,191	5,552	0,587
Julho	0,275	0,9078	0,8745	0,79	Muito bom	0,7647	0,218	5,773	0,508
Agosto	0,366	0,8951	0,8408	0,75	Muito bom	0,7070	0,301	6,511	0,404
Setembro	0,416	0,8693	0,8297	0,72	Bom	0,6885	0,371	6,879	0,308
Outubro	0,385	0,8840	0,8174	0,72	Bom	0,6682	0,343	6,385	0,315
Novembro	0,201	0,9092	0,8663	0,79	Muito bom	0,7505	0,171	3,841	0,460
Dezembro	0,237	0,8665	0,7800	0,68	Bom	0,6085	0,190	4,579	0,383

*R² – Coeficiente de determinação da validação cruzada; REMQ – Raiz do Erro Médio Quadrático; d – Índice de Concordância; r - Coeficiente de Correlação de Pearson; c – Índice de Confiança; EMA – Erro Médio Absoluto (mm dia⁻¹); EMP - Erro Médio Percentual; e NSE - Eficiência Nash-Sutcliffe.

Segundo Souza et al. (2011), o emprego desse conjunto de indicadores estatísticos pode ser considerado uma boa opção para validação de modelos estatísticos. Os indicadores permitem a realização de análises simultâneas do desvio da média e da identificação da ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento dos modelos, quando comparados com valores estimados e medidos (SILVA JUNIOR, 2017).

O índice de concordância (d) refletiu a precisão dos valores de ET_0 preditos pela Krigagem ordinária em relação aos valores observados pelas estações, o valor médio foi de 0,9030 (variando de 0,8665 à 0,9491), indicando a elevada concordância entre os valores estimados e interpolados. Os valores obtidos de “r” indicam que a krigagem interpolou a ET_0 com elevada correlação (média de 0,852). Já os valores de “R²” encontrados (média de 0,727) indicam que os valores estimados e interpolados variaram de forma proporcional, que demonstra de forma satisfatória a variabilidade sazonal da ET_0 (SILVA JUNIOR, 2017). Os valores de REMQ variaram de 0,181 à 0,416, com média de 0,267. Os resultados encontrados estão similares aos encontrados por Vila Nova, et al. (2012) e por Silva Junior (2017).

Analisando conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, através do índice de confiança (c), o desempenho foi considerado bom para 5 meses, muito bom para 6 meses e ótimo para um mês, segundo critério de Camargo e Sentelhas (1997). Ressalta-se que nos entre os meses março a agosto, foi o período onde observou os melhores índices.

O erro médio absoluto (EMA) variou de 0,154 mm dia⁻¹, em janeiro até 0,371 mm dia⁻¹ em setembro. Já o erro médio percentual (EMP) variou de 3,5% em janeiro até 6,9 % em outubro.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) varia entre $-\infty$ e 1, sendo que valores inferiores a zero acusam uma ineficiência do método de interpolação. Quanto maior o valor, melhor a eficiência do método. O índice NSE variou de 0,308 a 0,594, com valor médio de 0,463, demonstrando a eficiência no método de interpolação (krigagem) utilizado no trabalho.

Os resultados das estimativas de ET_0 obtidos via krigagem, baseando-se nos indicadores expostos na Tabela 5, foram considerados satisfatórios. Resultados semelhantes também foram encontrados por Hodam et al. (2017).

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O NORTE E NOROESTE DE MINAS GERAIS

CONCLUSÕES

Foram identificadas 5 zonas homogêneas de ET_0 para as mesorregiões Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais. As médias de evapotranspiração preditas pela Krigagem ordinária foram similares às observadas (medidas) pelas estações meteorológicas convencionais. Os indicadores estatísticos mostraram-se satisfatórios. Esses valores estimados de ET_0 podem ser utilizados como informação auxiliar na elaboração de projetos e no manejo da irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agência Nacional de Águas; EMBRAPA Milho e Sorgo. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**: ano 2014. Brasília, 2016. 1 mapa. Escala 1:50.000 Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/metadados>>. Acesso em: 15 jun. 2017.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56.)
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CASTRO, F. da S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p.871–880, 2010.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+™. GeoStatics for the Environmental Sciences**. Version 10 Demo. Plainwell, Michigan: Gamma Design Software, 2002.
- HODAM, S.; SARKAR, S.; MARAK, A. G. R.; BANDYOPADHYAY, A.; BHADRA, A. Spatial Interpolation of Reference Evapotranspiration in India: Comparison of IDW and Kriging Methods. **Journal of The Institution of Engineers**, v. 98, n. 4, p. 511–524, 2017.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bases e referenciais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Vários mapas. Escalas variam. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 jun. 2017.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Brasília, DF: INMET, 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 15 set. 2017.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil, 1981-2010**. Brasília: INMET, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 12 fev. 2019.
- LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 298-306, 2009.
- MANCOSU, N.; SNYDER, R. L.; SPANO, D. Procedures to Develop a Standardized Reference Evapotranspiration Zone Map. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 140, n. 9, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.19434774.0000697](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.19434774.0000697)

- MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 30, p. 485-496, 2006.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p - 282-290, 1970.
- PEREIRA, L. S., ALLEN, R. G., SMITH, M., RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.
- PIRES, C. A. F.; REIS, J. T.; DULLIUS, Â. I.; S.; PRIESNIT, M. C.; PEREIRA, M. J. Krigagem ordinária aplicada à precipitação pluviométrica nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1303 – 1311, 2016.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.
- SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. F.. Estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte do Brasil. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 13, n. 2, p. 19-31, 2015.
- SILVA JUNIOR, J. F. **Evapotranspiração de referência como base para o manejo sustentável da irrigação no Noroeste Paulista**. 2017. 82 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu.
- SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F.; REIS, L. S.; TEIXEIRA, A. H. de C. Estabelecimento dos meses mais críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 2, p. 122-131, 2018.
- SOUZA, A. P. de; CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. B. D. da; ALMEIDA, F. T. de; ROCHA, H. S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 219-228, 2011.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 460 p.
- VICENTE, M. R.; MANTOVANI, E. C.; FERNANDES, A. L. T.; DELAZARI, F. T.; FIGUEREDO, E. M. Efeito de diferentes lâminas de irrigação nas variáveis de desenvolvimento e produção do café irrigado por pivô central. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 528-543, 2015.
- VICENTE, M. R.; SANTOS, J. A.; SANTOS, R. M.; LEITE, C. V. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o Vale do Jequitinhonha. **Global Science and Technology**, v. 07, n. 02, 2014. p.106 – 118.
- VILA NOVA, M. R. N.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C, B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 2, p. 179-194, 2012. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.763>.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.