ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Classificação de áreas semiáridas e subúmidas secas utilizando diferentes índices climáticos

Eliton Sancler Gomes Sales¹, Wendy Kaori Matsunaga², Mayara Monique Almeida Moura Nunes³, João Hugo Baracuy da Cunha Campos⁴, Josefina Moraes Arraut⁵, José Ivaldo Barbosa de Brito⁶.

1Doutorando em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) Campina Grande – Paraíba, Brasil, elitonsancler@hotmail.com; 2Doutoranda em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) Campina Grande – Paraíba, Brasil, wmatsunaga@gmail.com; 3Mestra em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) Campina Grande – Paraíba, Brasil, mayara_mtr@hotmail.com; 4Professor da Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde – CCTS, Araruna – Paraíba, Brasil, jhugocampos@pesquisador.cnpq.br; 5Professora da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) Campina Grande – Paraíba, Brasil, josefina.arraut@gmail.com; 6Professor da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) Campina Grande – Paraíba, Brasil, jivaldobrito@gmail.com.

Artigo recebido em 29/06/2020 e aceito em 27/03/2021

RESUMO

As delimitações das áreas semiáridas do Nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais podem apresentar grandes diferenças conforme os métodos de classificação climática e de estimativa da evapotranspiração potencial (ET₀) utilizados. Para demonstrar esta afirmação de forma quantitativa, nesta pesquisa, delimitou-se as áreas semiáridas usando dois métodos de classificação climática (1) índice efetivo de umidade de Thornthwaite (I_m) e (2) índice de aridez do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (I_{aUNEP}), enquanto, para a estimativa da ET₀ usou-se os métodos de (1) Thornthwaite e (2) Penman-Monteith-FAO (PMF), totalizando quatro diferentes configurações de delimitações de áreas semiáridas. Com a utilização de I_m observou-se um aumento do grau de aridez e de áreas semiáridas quando comparado com os resultados obtidos com o uso de I_{aUNEP}. Do mesmo modo, ao usar a estimativa de ET₀ pelo método PMF verifica-se um aumento da aridez e das terras semiáridas em comparação com a ET₀ calculada por Thornthwaite. Como o método PMF é geralmente reconhecido como um método padrão para estimativa da ET₀. Portanto, é possível certificar que o grau de aridez e de terras semiáridas no Nordeste do Brasil são mais elevados do que aqueles mostrados nos estudos com a estimativa de ET₀ por Thornthwaite.

Palavras-chave: Semiárido, Classificação Climática, Evapotranspiração Potencial.

Classification of semi-árid and sub-humid areas using different climate indexes

ABSTRACT

The delimitations of semi-arid areas in the Northeast of Brazil and northern Minas Gerais can present great differences according to the methods of climatic classification and estimation of potential evapotranspiration (ET₀) used. To demonstrate this statement in a quantitative way, in this research, we used two different methods of climate classification: (1) the moisture index of Thornthwaite (I_m) and (2) aridity index of the United Nations Environment Program (I_{aUNEP}), as well as, two methods to estimate ET₀: of (1) Thornthwaite and (2) Penman-Monteith-FAO (PMF), totaling four different configurations of delimitations of semi-arid areas. As the use of I_m an increase in the degree of aridity and semi-arid areas was observed when compared with the results obtained as the use of I_{aUNEP}. Similarly, when using the ET₀ estimate using the PMF method, there is an increase in aridity and semi-arid land compared to the ET₀ calculated by Thornthwaite. As the PMF method is generally recognized as a standard method for estimating ET₀. Therefore, it is possible to affirm that the degree of aridity and semi-arid lands in Northeast Brazil are higher than those shown in studies with the estimate of ET₀ by Thornthwaite.

Keywords: Semi-arid, climatic classification, potential evapotranspiration.

Introdução

As regiões semiáridas, como o próprio nome está diagnosticando, são aquelas inseridas em áreas de clima semiárido, que apresentam um grau de aridez relativamente elevado, para serem classificadas como úmidas e relativamente baixas, para serem denominadas de áridas. A propósito, conforme, Hartmann (2016) o clima é a síntese do tempo em uma região específica e é composto por diversos elementos, como radiação solar, precipitação, temperatura e umidade do ar, vento, pressão atmosférica, evapotranspiração e nebulosidade, porém Ahrens e Henson (2016) descrevem que o conceito de clima também inclui os extremos climáticos, bem como a frequência desses extremos, ou seja, a sua variabilidade que é um dos mecanismos mais conhecidos da dinâmica climática. Ressalta-se que os impactos provocados por essa variabilidade, mesmo dentro do aguardado pode ter representações expressivas nas atividades humanas. Também é admissível mencionar que as regiões classificadas como semiáridas, em geral, apresentam grande variabilidade do clima, como é o caso das áreas semiáridas do Brasil (Huang et al., 2016; Schmidt et al., 2018; De Medeiros et al., 2019; Zhang et al., 2019).

O Semiárido Brasileiro compreende uma área de 1,128 milhão de km² (13,2% da área do Brasil) e reúne uma população de 27,82 milhões de pessoas (estimativa do IBGE para 2020, IBGE, 2020) (13,4% da população brasileira) vivendo em 1.262 municípios de dez estados da Federação: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, além da região norte do estado de Minas Gerais (Brasil, 2017).

A disponibilidade natural de água na região Semiárido do Brasil é caracterizada pela distribuição espacial e temporal das chuvas, que são bastante irregulares, apresentam baixos totais médios anuais, grande variabilidade interanual e extensos períodos de estiagem (Hastenrath, 2012, Nys e Engle, 2014; Martins et al., 2018). Os distintos sistemas de circulação atmosférica que atuam nesta região tornam a climatologia complexa, refletindo em uma extensa variabilidade climática, considerando as chuvas, com eventos de precipitação variando no tempo e no espaço, como por exemplo, os extensos períodos de estiagem que são influenciados pelo El Niño e gradiente de anomalia da temperatura da superfície do Atlântico Tropical, trazendo como consequência danos irreparáveis à população da região, particularmente àquela que retiram seu sustento da atividade agrícola, em especial a agricultura familiar (Cavalcanti, 2012; Rodriguez et al., 2016).

Vale salientar que a área semiárida do Brasil é limitada ao leste por uma região úmida, a mata atlântica, ao oeste pela floresta tropical chuvosa da Amazônia e ao sul e sudoeste pelas áreas subúmida úmida de Minas Gerais, Goiás e Tocantins. Ao norte do Nordeste, sobre o oceano Atlântico, observa-se um gradiente positivo de precipitação em direção ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Mesmo estando em uma área circundada por regiões úmidas e subúmida úmida, conforme o índice efetivo de umidade de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), pesquisas apontam para um aumento da aridez na região Nordeste, principalmente devido ao aumento da temperatura do ar, como, por exemplo, descreveram Almeida et al. (2015) que expõem uma tendência significativa de avanço da temperatura média para o Nordeste do Brasil para o período de 2017 a 2100. No quinto relatório de avaliação (AR5) do IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change – (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) registra, para o RCP4.5, aumento da temperatura média no Nordeste de 1,7°C a 2,5°C, em relação aos valores atuais, para o período de 2017 a 2100, enquanto, para a precipitação aponta uma diminuição de até 7% (IPCC, 2013).

Além dos números apresentados no AR5 do IPCC (2013), Marengo et al. (2017) descreveram que para todo o Nordeste há uma tendência de acentuação do clima mais seco, diminuições da precipitação e, por consequência, aumento da carência hídrica, ambos integrados com os acréscimos da temperatura do ar. As alterações climáticas que originam diminuição da disponibilidade hídrica têm consequências prejudiciais nos âmbitos social e econômico, como desemprego, desestruturação do setor agropecuário, dificuldades de saúde, desabastecimento de água nas áreas urbanas e rurais e aumento de emigração.

No âmbito governamental, a primeira delimitação do Semiárido foi definida pela Lei n. 7.827, de 27.09.1989. O Semiárido era, então, uma região com precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm (IBGE, 2014). Contudo, objetivando aprimorar a metodologia de delimitação do Semiárido, em 2004 o Ministério da Integração, instituiu um grupo de trabalho interministerial objetivando estabelecer critérios técnicos para delimitação da área semiárida do Brasil (SUDENE, 2017). Entre os critérios definidos pelo grupo de trabalho, um foi o índice de aridez do UNEP (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – sigla em inglês – United Nations Environment Programme), I_aUNEP (UNEP,

1992) que apresenta um valor numérico para classificar áreas áridas, semiárida e subúmida seca, que depende da estimativa da evapotranspiração potencial calculada pelo método de Thornthwaite (1948), que leva em consideração para seu cálculo apenas as variáveis de temperatura e o comprimento do dia do nascer ao pôr do sol, e da precipitação. Também ficou estabelecida que a delimitação das áreas semiáridas do Brasil deve ser revista a cada dez anos.

É oportuno descrever que mesmo apresentado um valor numérico o I_{aUNEP} dependente da estimativa da evapotranspiração potencial, que pode apresentar valores diferentes para a mesma localidade e mesmo período, conforme o método de estimativa utilizado. Além disso, o I_{aUNEP} não é o único método que informa um valor numérico para executar uma classificação climática, existem outros, com, por exemplo, o índice efetivo de umidade de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

Diante disto, a demarcação da área do semiárido brasileiro tem gerado muitas discussões técnicas e políticas, tanto em relação aos critérios adotados como aos métodos de estimativas dos próprios critérios. Como já mencionado anteriormente, um dos critérios é o índice de aridez do UNEP, que mesmo apresentando um valor numérico para cada localidade tem sido motivo de controvérsia na determinação do seu valor para classificar uma região como semiárida (FUNCME, 2017a; FUNCME, 2017b). Neste índice de aridez é função da ET_0 , cujo valor, para uma mesma localidade e mesmo período de tempo, pode ser bastante diferente, conforme o método de estimativa. Na última delimitação do Semiárido o Ministério da Integração Nacional utilizou o índice de aridez do UNEP calculado com a ET_0 estimada por Thornthwaite. Ressalta-se que usando outro

método para estimativa de ET_0 obtém-se valor diferente para o índice de aridez. Portanto, realizar pesquisas buscando informações para verificar a eficácia e a robustez do método e critério adotados na obtenção de índices de aridez sólidos, que apresente resultados confiáveis quando comparado com outros índices descritos na literatura e cientificamente aceito como um bom estimador do grau de aridez é relevante e plenamente justificável.

Deste modo, o presente estudo propõem realizar a classificação climática da Região Nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais utilizando os índices climáticos I_{aUNEP} e I_m e a estimativa da evapotranspiração potencial, ET_0 , pelos métodos de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith-FAO (PMF) (Allen et al., 1998), neste último, nos estudo agroclimáticos a ET_0 é denominada de evapotranspiração de referência, entretanto, para os propósitos desta pesquisa é apropriado denominar de evapotranspiração potencial. Por fim, após a realização da classificação climática é elaborada uma análise para verificar possíveis discrepâncias nos tipos de climas obtidos, conforme o índice utilizado e o método de estimativa da evapotranspiração empregado.

Material e métodos

Área de Estudo

No presente trabalho a área geográfica de estudo é o Nordeste do Brasil e o norte de Minas Gerais, com um olhar voltado para delimitação de áreas classificadas como áridas, semiáridas e, em menor escala, subúmida seca.

Figura 1. Distribuição espacial das 110 estações meteorológicas do INMET utilizadas na presente pesquisa. Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Dados

Os dados para a realização desta pesquisa foram de temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), velocidade do vento (m/s), insolação total (horas), umidade relativa (%), pressão atmosférica ao nível do barômetro (kPa), valores médios mensais, exceto a precipitação que são totais mensais, de janeiro a dezembro do período de 1981 a 2010, dos nove estados que compõem o Nordeste do Brasil (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) e norte de Minas Gerais. Estes dados foram oriundos de 110 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, cuja distribuição espacial é mostrada na Figura 1.

Metodologia

O cálculo do $I_{a\text{UNEP}}$ é dado pela razão entre a precipitação total anual e a evapotranspiração potencial total anual da localidade. Neste trabalho, para estimar a evapotranspiração potencial total anual, foi empregado o método de Thornthwaite (1948) e PMF (Allen et al., 1998) e em seguida calculado o respectivo índice.

Os índices de aridez (I_a), umidade (I_u) e efetivo de umidade (I_m) de Thornthwaite (1948) para os nove estados que compõem o nordeste brasileiro, foram estimados por meio do Balanço

Hídrico seriado segundo o modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955) e desenvolvido em planilha eletrônica por Rolim e Sentelhas (1998). O balanço hídrico foi calculado para os nove estados do Nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais.

Foram utilizados os valores da máxima capacidade de água disponível pelo solo (CAD) apresentado por Brito (2000), que apresenta a distribuição espacial de CAD referente a cada tipo de solo do respectivo município que possuía estações do INMET.

Cálculo do Índice de aridez do UNEP

Para realizar o cálculo do índice de aridez do UNEP para o período de 1981 a 2010, foi utilizada a equação utilizada no relatório da UNEP para terras susceptíveis a desertificação (UNEP, 1992).

$$I_{a\text{UNEP}} = \frac{PR_{\text{total}}}{ET_0} \quad (1)$$

em que:

$PR_{\text{total}} \rightarrow$ Precipitação total anual;

$ET_0 \rightarrow$ Evapotranspiração potencial total anual.

A Tabela 3.1 mostra a classificação climática de acordo com o I_{aUNEP} . Esse índice tem sido utilizado com medidor das áreas sujeitas aos processos de desertificação pelo UNEP (UNEP, 2007). Neste contexto, Vieira et al. (2020) utilizaram este índice para avaliar os riscos de desertificação no Nordeste do Brasil, mostrando as tendências atuais e cenários futuros.

Tabela 3.1. Classificação climática de acordo com o I_{aUNEP} .

Índice de Aridez	Classes Climáticas
$IA \geq 1,00$	Úmido
$0,65 < IA < 1,00$	Subúmido Úmido
$0,50 < IA \leq 0,65$	Subúmido Seco
$0,20 < IA \leq 0,50$	Semiárido
$0,05 < IA \leq 0,20$	Árido
$IA \leq 0,05$	Hiperárido

Fonte: Adaptado de UNEP (1992).

Cálculo do Índice de Aridez de Thornthwaite

Para calcular o Índice de Aridez no período de 1981 a 2010, foi utilizada a fórmula preparada por Thornthwaite (1948):

$$I_a = \frac{DEF}{ET_0} \times 100 \quad (2)$$

em que:

DEF → Déficit anual de água na atmosfera.

ET₀ → Evapotranspiração potencial anual.

Cálculo do Índice de umidade de Thornthwaite

De acordo com os dados obtidos do balanço hídrico para cada período estudado, utiliza-se para definir o índice de umidade, que é a relação em percentagem entre o excesso de água e a evapotranspiração potencial, fórmula organizada por Thornthwaite (1948):

$$I_u = \frac{EXC}{ET_0} \times 100 \quad (3)$$

em que:

EXC → Excedente anual de água no solo.

ET₀ → Evapotranspiração potencial anual.

Cálculo do Índice efetivo de umidade de Thornthwaite

Para o cálculo do Índice efetivo de umidade (I_m), relaciona os dois índices acima, a expressão que fornece este índice é:

$$I_m = I_u - 0,6 \times I_a \quad (4)$$

A Tabela 3.2 mostra a classificação do tipo de clima de uma região, de acordo com o I_m .

Tabela 3.2. Classificação do tipo de Clima de acordo com o I_m .

I_m	Tipo de Clima
$I_m \leq -60$	Hiper-árido
$-60 < I_m \leq -40$	Árido
$-40 < I_m \leq -20$	Semiárido
$-20 < I_m \leq 0$	Subúmido Seco
$0 < I_m \leq 20$	Subúmido Úmido
$20 < I_m \leq 40$	Úmido 1
$40 < I_m \leq 60$	Úmido 2
$60 < I_m \leq 80$	Úmido 3
$80 < I_m \leq 100$	Úmido 4
$I_m \leq 100$	Superúmido

Fonte: Adaptado de Brito (2000).

Cálculo da Evapotranspiração Penman-Monteith-FAO

A evapotranspiração de referência (ET₀) foi estimada para as localidades que dispõem de dados de estações meteorológicas do INMET, de acordo com a equação da FPM, conforme mostra a seguir:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{86,4 \rho c_p (e_s(z) - e(z))}{r_a}}{\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (5)$$

onde λ [MJkg⁻¹] é o calor latente de evaporação da água, Δ [kPa°C⁻¹] é a derivada da pressão de saturação do vapor d'água com em função da temperatura do ar ($d(e_s(T))/dT$), R_n [MJm⁻²d⁻¹] é o saldo de radiação, G [MJm⁻²d⁻¹] é o fluxo vertical de calor do solo, ρ [kgm⁻³] é a densidade do ar, c_p [kJkg⁻¹°C⁻¹] é o calor específico do ar a pressão constante, $e_s(z)$ [kPa] é a pressão de

saturação de vapor do ar estimado na altura z , $e(z)$ [kPa] é a pressão de vapor do ar medido na altura z , r_a [sm^{-1}] é a resistência aerodinâmica para a difusão do vapor d'água na camada limite superficial, r_c [sm^{-1}] é a resistência do dossel da vegetação à transferência do vapor d'água, γ é o parâmetro psicrométrico ($\gamma = 10^{-3} P c_p / (0,622 \lambda)$), $\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T$ [MJ kg^{-1}], T temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$], P pressão atmosférica na superfície [kPa] e 86,4 é o fator de conversão de [kJ s^{-1}] para [MJ d^{-1}]. Para estimar a ET_0 , usando a equação (5) Allen *et al.* (1994) introduziram as seguintes parametrizações:

densidade do ar (ρ):

$$\rho = \frac{3,486P}{1,01(T + 273)} \quad (6)$$

calor específico do ar a pressão constante (c_p):

$$c_p = \frac{622\lambda\gamma}{P} \quad (7)$$

resistência aerodinâmica (r_a):

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_w - d_0}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_p - d_0}{z_{ov}}\right)}{k^2 U(z_w)} \quad (8)$$

em que z_w e z_p são as alturas do anemômetro (velocidade do vento) e do psicrômetro (umidade), respectivamente, d_0 é a altura de deslocamento do plano de velocidade do vento zero, z_{om} é o comprimento de rugosidade para transferência de momentum, z_{ov} é o comprimento de rugosidade para transferência de vapor, k é a constante de von Kármán e $U(z_w)$ é a velocidade do vento medida na altura z_w . A equação (8) é válida para atmosfera neutra (sem convecção) na escala de tempo de um dia ou maior, que é uma condição típica do semiárido do Nordeste em quase todos os meses do ano. A vegetação de referência será tomada como sendo grama de altura $h_c = 12$ cm e resistência do dossel r_c de 70 s/m. Jensen *et al.* (1990) sugeriram $d_0 = 0,67h_c$, $z_{om} = 0,123h_c$, $z_{ov} = z_{om}$ e $k = 0,41$.

Substituindo esses valores na equação (5) e usando a velocidade do vento a 2m da superfície e introduzindo as equações (6), (7) e (8) na equação (5) obtém-se:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (9)$$

sendo ET_0 é obtida em mm/dia, U_2 [m/s] é a velocidade do vento em 2 m de altura da superfície, e_a [kPa] é a pressão de vapor a saturação e e_d [kPa] é a pressão real de vapor, estimados para medidas no abrigo meteorológico. Ressalta-se que detalhe da estimativa de cada variável da equação (9) pode ser obtido em Allen *et al.* (1998).

Cálculo da Evapotranspiração Potencial Método de Thornthwaite

A estimativa da evapotranspiração potencial mensal, segundo Thornthwaite (1948) pode ser definida pela seguinte fórmula:

$$ET_{0\text{mês}} = 16 \times ((10 \times T / I_{\text{ano}})^a) \times (N/12) \times (\text{Dias}_{\text{mês}}/30) \quad (10)$$

em que:

$ET_{0\text{mês}}$ – Evapotranspiração potencial (mm/mês);
 T – Temperatura do ar média mensal ($^{\circ}\text{C}$);
 I_{ano} – Índice de calor anual, que é dado pela soma dos 12 índices mensais i_j , ou seja, pela equação:

$$I_{\text{ano}} = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (11)$$

i_j é o índice de calor mensal obtido da seguinte maneira:

$$i_j = (0,2 \times T)^{1,514} \quad (12)$$

a – é uma variável adimensional que é função de I_{ano} , dada por:

$$a = 0,49 + 0,018 \times I_{\text{ano}} - 7,71 \times 10^{-5} I_{\text{ano}}^2 + 6,75 \times 10^{-7} I_{\text{ano}}^3 \quad (13)$$

N – a duração máxima de insolação por dia (horas/dia) é calculado em função da latitude do local e da declinação solar (Moura et al., 2009), calculado por:

$$N = 2x(h_n/15) \quad (14)$$

h_n é o comprimento do dia do nascer ao pôr do sol, em graus, dado por:

$$h_n = \text{Arcos}(-\tan(\varphi)\tan(\delta)) \quad (15)$$

em que,

φ – é a latitude local;

δ – é a declinação do sol, estimada por:

$$\delta = 23,45 \times \text{SEN}((360/365,25) \times (\text{NDA} - 81)) \quad (16)$$

NDA – é o número do dia do ano entre 1 (1 de janeiro) e 365 ou 366 (31 de dezembro);

Dias_{mês} – número de dias do mês.

Resultados e discussão

Em seu quarto relatório sobre as perspectivas do meio ambiente global o UNEP reforça as possibilidades de processos de desertificação das terras áridas, semiáridas e subúmidas secas, bem como, descreve as estratégias de gestão de risco para os sistemas agrícolas de terras áridas, semiárida e subúmidas secas (UNEP, 2007). No quarto relatório também menciona a relação entre os ecossistemas, à cobertura vegetal e o clima. Nesta pesquisa é mostrado que uma mesma localidade pode ser classificada como semiárida ou subúmida seca, conforme o método utilizado.

As Figuras 2.a e 2.b apresentam as classificações climáticas obtidas utilizando I_m calculado com a estimativa da evapotranspiração por Thornthwaite e PMF, respectivamente.

Comparando as figuras observa-se um aumento das áreas áridas na parte central da Região Nordeste, abrangendo parte do Piauí, Ceará, Pernambuco e Bahia. Ressalta-se que esta área apresenta o maior déficit de pressão de vapor d'água ($e_a - e_d$) anual do Nordeste (Brito, 2000), como esta variável está presente na estimativa de ET_0 por PMF e não está por Thornthwaite. Consequentemente, o valor de ET_0 por PMF é superior ao de Thornthwaite fazendo com que se

Finalmente, a ET_0 é a soma das doze $ET_{0\text{mês}}$ mensais.

O valor de NDA de cada mês é apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Valor do NDA de cada mês

Meses	NDA	Meses	NDA
Janeiro	15	Julho	195
Fevereiro	45	Agosto	225
Março	75	Setembro	255
Abril	105	Outubro	285
Mai	135	Novembro	315
Junho	165	Dezembro	345

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Classificação Climática

A classificação climática foi realizada utilizando os índices I_m e $I_{a\text{UNEP}}$ obtidos a partir dos dados climatológicos para o período de 1981 a 2010, de todas os municípios da Região Nordeste e do norte de Minas Gerais que dispõem de estações meteorológicas do INMET. Ao todo são apresentadas quatro configurações espaciais de classificação climática, pois se tem dois índices e dois métodos de estimativa de ET_0 .

obtenha I_m menor quando se usa ET_0 estimada por PMF, levando a uma classificação de clima mais árido. Também se observou aumento das áreas áridas (Figura 2a e 2b) na parte central da Paraíba e região do Seridó no Rio Grande do Norte. Menezes Neto et al. (2009) observaram que, no Nordeste do Brasil, os maiores valores da radiação solar global média anual estão na parte central da Paraíba e no Seridó do Rio Grande do Norte. Isto pode elevar o valor de ET_0 estimado por PMF, quando comparado ao obtidos usando Thornthwaite. Como consequência, do maior valor de ET_0 , tem-se um aumento do grau de aridez e diminuição do valor de I_m . Ressalta-se que Silva et al. (2020) observaram um elevado grau de aridez na bacia hidrográfica do Alto Paraíba do Norte, que está localizada na parte central do estado da Paraíba.

Continuando a comparação das Figuras 2.a e 2.b ainda se verifica um aumento das áreas semiáridas do Ceará até a Bahia, enquanto, no Maranhão observa-se uma diminuição das áreas subúmida seca que se torna subúmida úmida. Esta configuração é decorrente tanto do déficit de pressão de vapor d'água, em que são observados os menores valores no Maranhão (Brito, 2000) como da distribuição espacial da radiação solar global média anual observada na superfície (Menezes

Neto, 2009). É oportuno mencionar que ao usar a metodologia de Thornthwaite observam-se áreas no Nordeste classificadas como árida, clima este não observado ao utilizar outros métodos. Neste contexto, ressalta-se que Marcos Junior (2018) usando dados de pontos de grade da Climatic Research Unit da Universidade de East Anglia e a metodologia de Thornthwaite também obtiveram áreas com clima árido na parte central do Nordeste.

Por outro lado, era esperado um aumento do grau de aridez em áreas da Região Nordeste, com exceção do Maranhão, quando substitui a ET_0 obtida pelo método de Thornthwaite pela obtida por PMF (Figuras 2.a e 2.b), pois a ET_0 na região

Nordeste obtida com o método PMF é superior à estimada por Thornthwaite, exceto no Maranhão. A configuração espacial de I_m calculado com a estimativa da ET_0 por PMF é semelhante ao obtida por Brito (2000). É salutar informar que conforme Lang et al. (2017) o método PMF é geralmente reconhecido como um método padrão para estimativa da Evapotranspiração Potencial. Portanto, é possível conjecturar que com exceção do Maranhão a aridez no Nordeste do Brasil é mais elevada que a indicada quando se usa a evapotranspiração potencial estimada pelo método de Thornthwaite.

(2.a)

(2.b)

Figura 2. Classificação climática de acordo com o I_m quando estima a ET_0 pelos métodos: (2a) Thornthwaite e (2b) PMF. Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Nas Figuras 3.a e 3.b são apresentadas as configurações espaciais da classificação climática, na Região Nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais, de acordo com I_{aUNEP} calculado com a estimativa da evapotranspiração potencial pelos métodos de Thornthwaite e PMF, respectivamente. Observa-se uma expansão das áreas com clima semiárido quando usada a ET_0 estimada por PMF em comparação com a estimada pelo método de

Thornthwaite. Esta expansão ocorre em todos estados do Nordeste, exceto o Maranhão, porém com uma maior abrangência no estado da Bahia e no norte de Minas Gerais (Figuras 3.a e 3.b), ou seja, de um modo geral, ao substituir a evapotranspiração potencial estimada pelo método de Thornthwaite pela obtida por PMF observa-se um aumento do grau de aridez em quase todo Nordeste, tanto usando o I_{aUNEP} como o I_m .

(3.a)

(3.b)

Figura 2. Classificação climática de acordo com o I_m quando estima a ET_0 pelos métodos: (2a) Thornthwaite e (2b) PMF.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Ressalta-se que as áreas semiáridas e subúmida secas da Figura 3.a são inferiores as apresentadas por Marengo et al. (2015), que mostraram as configurações de áreas áridas, semiáridas e subúmida secas para o Nordeste do Brasil com dados climáticos para o período de 1961 a 1990. Entretanto, para projeções futuras as áreas apontadas por Marengo et al. (2015) com estas classificações climáticas torna-se mais abrangentes que as obtidas na presente pesquisa.

Por um lado, quando compara as Figuras 2.a com 3.a verifica-se que ao utilizar o I_{aUNEP} para classificação climática em substituição ao I_m , observa-se uma diminuição drástica das áreas áridas, que não são observadas quando usa-se I_m , e das áreas semiáridas com uma redução de quase 50%. Também é observada pequena diminuição das áreas subúmida seca e aumento das áreas subúmida úmida e úmida. Por outro lado, ao comparar as Figuras 2.b e 3.b também se verifica uma drástica diminuição das áreas áridas, uma pequena diminuição das áreas semiáridas e

aumentos das áreas subúmida secas, subúmida úmida e úmida, ou seja, com relação às terras secas (árida, semiárida e subúmida seca) o I_{aUNEP} quantifica um menor grau de aridez destas áreas do que o I_m . Isto é decorrente das variáveis envolvidas nos cálculos destes índices. Para a estimativa de I_{aUNEP} é necessário dados de precipitação e da ET_0 totais anuais, enquanto, para o I_m , além destas variáveis ainda necessita a obtenção dos conteúdos (déficits/superávits) de umidade no solo e na atmosfera valores médios mensais e anuais.

Comparando as quatro Figuras (2.a, 2.b, 3.a e 3.b) a metodologia que apresentou menores áreas áridas e semiáridas foi o uso de I_{aUNEP} com estimativa de ET_0 pelo método de Thornthwaite, enquanto, a que apresentou maiores áreas áridas e semiáridas foi a utilização de I_m e método de estimativa de ET_0 por PMF. Ressalta-se que nas limitações de áreas semiáridas o Ministério da Integração Nacional utilizou o índice I_{aUNEP} e ET_0 estimada por Thornthwaite.

De acordo com Verejão Silva (2001) o método desenvolvido por Thornthwaite para calcular os valores de evapotranspiração possuem diversas aplicações, principalmente nos estudos ecológicos, agrometeorológicos, gestão dos recursos hídricos e climatologia. Todavia, seu modelo não ficou livre de críticas, especialmente por não analisar os inúmeros fatores que intervêm na transferência de vapor d'água para a atmosfera.

Na Tabela 4.1 mostra as áreas em Km² para cada tipo de clima conforme estimativa pelos índices I_m e I_{aUNEP} e ET_0 por Thornthwaite e PMF. Observa-se que quando o I_m é calculado pela ET_0

de Thornthwaite, o clima árido e semiárido passa de 66.505,8 Km² e 777.182,9 Km² para 251.034,9 Km² e 855.611,8 Km² respectivamente, quando calculado pela ET_0 de PMF, apresentando um aumento percentual de 377,46% para o clima árido e 10,1% para o semiárido, obtendo-se condições de aridez e semiaridez mais elevada. O grau de aridez mais elevado quando comparada as Figuras 2.a e 3.b pode ser visualizado na região do Seridó do Rio Grande do Norte, região central da Paraíba compreendendo todo o Cariri ocidental e oriental, o norte da Bahia, sudoeste e noroeste de Pernambuco, leste do Piauí e sudoeste do Ceará.

Tabela 3. Cálculo das áreas para cada tipo de clima classificado com o índice efetivo de umidade e aridez da UNEP quando calculados com a ET_0 de Thornthwaite e PMF. Dados referentes à Figura 2 – A, B e Figura 3 – C, D, respectivamente.

		I_m Thornthwaite	I_m PNM
I_m	Tipo de Clima	Área em Km²	Área em Km²
$-60 > I_m \leq -40$	Árido	66.505,8	251.034,9
$-40 > I_m \leq -20$	Semiárido	777.182,9	855.611,8
$-20 > I_m \leq 0$	Subúmido Seco	595.875,5	340.052,8
$0 > I_m \leq 20$	Subúmido Úmido	150.403,9	139.256,2
$20 > I_m \leq 40$	Úmido 1	46.411,1	40.762,9
$40 > I_m \leq 60$	Úmido 2	3.264,7	13.058,2
$60 > I_m \leq 80$	Úmido 3	132,9	0,0
		I_{aUNEP} Thornthwaite	I_{aUNEP} PNM
I_{aUNEP}	Tipo de Clima	Área em Km²	Área em Km²
$I_a \leq 0,05$	Hiperárido	0,0	0,0
$0,05 < I_a \leq 0,22$	Árido	0,0	1.080,6
$0,20 < I_a \leq 0,50$	Semiárido	433.273,2	812.026,9
$0,50 < I_a \leq 0,65$	Subúmido Seco	446.350,0	351.511,5
$0,65 < I_a < 1$	Subúmido Úmido	663.931,0	398.242,6
$I_a \geq 1$	Úmido	96.222,6	76.915,2

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Ainda na Tabela 3 verifica-se que nas Figuras 2.a e 2.b, para os climas Subúmido Seco, Subúmido Úmido, Úmido 1 e Úmido 3 houve um decréscimo de 57,07%, 7,41%, 12,17% e 100%, respectivamente, ao contrário do Clima Úmido 2 com um aumento de até 400%.

Na tabela 3 também é verificado que quando comparada as Figuras 3.a e 3.b, o clima Úmido, Subúmido Úmido e Subúmido Seco apresentam um decréscimo de 20,06%, 40,02% e 21,25% respectivamente, com um aumento significativo para o clima Semiárido de 187,42% quando o I_{aUNEP} é calculado com a ET_0 estimada por PMF.

Finalmente, na Tabela 3 é possível verificar a influência da ET_0 na classificação climática, quando empregada por diferentes métodos, assim como o índice climático utilizado para realizar a classificação do clima. Com relação aos dois índices de classificação climática usados nesta pesquisa ainda não é possível afirmar qual deles representa melhor as condições de aridez do Nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais. Entretanto, pode-se conjectura que o I_m por apresentar um maior número de variáveis em sua estimativa, entre elas os déficits/ superávits de umidade no solo e na atmosfera, possui capacidade de representar melhor os diversos graus de aridez. Com relação aos métodos de estimativa da ET_0 o

método PMF, em geral, é sugerido como o procedimento padrão, uma vez que frequentemente este método é denominado de ET_0 padrão FAO (Alencar et al., 2015). Portanto, é recomendável o não uso da metodologia de Thornthwaite (1948) para estimativa de ET_0 em estudo ou procedimentos de delimitações de áreas áridas, semiáridas e subúmida seca.

Conclusões

De acordo com o objetivo desta pesquisa e os resultados obtidos, verifica-se que o uso da ET_0 estimada por PMF apresenta uma maior quantidade de área classificadas com árida e semiárida, em comparação com a estimada por Thornthwaite. Ressalta-se que as estimativas de ET_0 por PMF mesmo apresentando um grau de aridez mais elevado exibem resultados mais robustos e confiáveis que a estimada por Thornthwaite, pois são utilizadas variáveis atmosféricas como a umidade do ar, velocidade do vento próximo à superfície, balanço de radiação e parâmetro de turbulência da atmosfera, que são fatores que altera a evapotranspiração real e potencial, mas não são consideradas na estimativa de ET_0 por Thornthwaite. Portanto, é recomendável o não uso da ET_0 estimada pelo método de Thornthwaite em estudo de classificação de áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas.

Na classificação climática de terras secas as estimativas com I_m apresenta um maior grau de aridez do que as com I_{aUNEP} . Contudo, ainda não é possível afirmar categoricamente qual destes dois índices é mais confiável na classificação climática de terras secas. Entretanto, no cálculo do I_m abrangem um número maior de variáveis atmosféricas e terrestres, que pode levar a resultados mais robustos.

Finalmente, é importante destacar que a classificação climática das áreas semiáridas do nordeste brasileiro realizadas pelo Ministério da Integração Nacional utiliza o índice I_{aUNEP} e ET_0 estimada por Thornthwaite. Esta metodologia pode elevar a classificação de uma quantidade de áreas semiáridas inferior à que realmente existe.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento a pesquisa.

Referências

- Ahrens, C. D., & Henson, R. 2016. Essentials of meteorology: An invitation to the atmosphere. Nelson Education.
- Alencar, L. P.; Sedyama, G. C.; Mantovani, E. C. 2015. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0 padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering (online). Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p39-50/2015> Acesso: 23 jun. 2018.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper, 56, 300.
- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., & Pereira, L. S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID bulletin, 2, 1-34.
- Almeida, H. D., Aguiar, D. D., Silva, J. D., & Damasceno, J. 2014. Indicadores hídricos do núcleo de desertificação da Microrregião do Seridó Ocidental da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, [online] 5. Disponível: <http://10.26848/rbgf.v7.5.p784-797>. Acesso: 23 jun. 2018.
- Brasil. Ministério da Integração Nacional. Nova delimitação do semiárido brasileiro. 2017. Disponível em: <http://sudene.gov.br/planejamento-regional/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: abril. 2019.
- Brito, J. I. B. 2000. Modelo regional de estimativa do balanço hídrico aplicado à variabilidade climática do Nordeste do Brasil. Campina Grande, Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal da Paraíba - UFPB, 2000. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/9617>. Acesso em: abril. 2018.

- Cavalcanti, I. F. A. 2012. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. *Atmospheric Research*, [online] 118. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.012>. 01 mar. 2019. Acesso: 21 jun. 2018.
- De Medeiros, F. J., Lima, K. C., Caetano, D. D. A., & Silva, F. J. D. O. 2019. Impacto da Variabilidade Interanual da Precipitação nos Reservatórios do Semiárido do Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, [online] 41. Disponível: http://10.11137/2018_3_731_741. Acesso: 15 jul. 2018.
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. 2017a. Funceme e BNB sugerem nova delimitação do Semiárido no Ceará. Disponível em <http://www.funceme.br/?p=1516>.
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. 2017b. Estudos da Funceme embasam nova delimitação do Semiárido brasileiro beneficiando mais 10 municípios do Ceará. 2017b. Disponível em <http://www.funceme.br/?p=1607>. Acessado em 24/11/2020.
- Hartmann, D. L. 2016. Atmospheric radiative transfer and climate. *Global Physical Climatology*, 49-94.
- Hastenrath, S. 2012. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. *Climatic Change*, [online] 112. Disponível: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0227-1>. Acesso: 01 mar. 2019.
- Huang, J., Ji, M., Xie, Y., Wang, S., He, Y., & Ran, J. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, [online] 46. Disponível: <http://10.1007/s00382-015-2636-8>. Acesso: 10 mar. 2019.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2014. Semiárido Brasileiro. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?edicao=16195&t=sobre>. Acessado em 24/11/2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2017. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso: 15 abr. 2018.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Normais Climatológicas para o período 1981-2010. 2018. Disponível: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso: 22 jan. 2019.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2013. The Fifth Assessment Report (AR5). Disponível: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>. Acesso: 13 jul. 2018.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. *American Society of Civil Engineers - ASCE*. Disponível: <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0067841>. Acesso: 28 jun. 2019.
- Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., ... & Zhang, M. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water*, [online] 9. Disponível: doi:10.3390/w9100734. Acesso: 15 jun. 2019.
- Marcos Junior, A. D., Da Silva Silveira, C., Das Chagas Vasconcelos Júnior, F., Guimarães, S. O., & Da Costa, J. M. F. 2018. Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [online] 33. Disponível: <https://10.1590/0102-7786334007>. Acesso: 12 jun. 2019.
- Marengo, J. A., & Bernasconi, M. 2015. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, [online] 129. Disponível: <https://10.1007/s10584-014-1310-1>. Acesso: 15 jun. 2019.
- Marengo, J. A., Torres, R. R., Alves, L. M. 2017. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, [online] 129. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>. Acesso: 12 jun. 2019.

- Martins, M. A.; Tomasella, J.; Rodriguez, D. A.; Alvalá, R. C. S.; Giarolla, A.; Garofolo, L. L.; Siqueira Júnior, J. L.; Paolicchi, L. T. L. C.; Pinto, G. L. N. 2018. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, v. 160, p. 21-30.
- Moura, F. E., Perdigão, A. C., & Siqueira, M. M. 2009. Seasonality of influenza in the tropics: a distinct pattern in northeastern Brazil. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, [online] 81. Disponível: <http://ajtmh.2009.81.180>. Acesso: 17 mar. 2019.
- Nys, E. D., Engle, N. 2014. Living with the semi-arid and proactive drought management in Northeast Brazil: a new perspective. Washington, DC: World Bank Group. Disponível: <http://www.worldbank.org/pt/country/brazil/brief/brazil-publications-agua-brasil-series-water>. Acesso 12 mar. 2020.
- Rodriguez, R. D., Singh, V. P., Pruski, F. F., & Calegario, A. T. 2016. Using entropy theory to improve the definition of homogeneous regions in the semi-arid region of Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, [online] 61. Disponível: <http://10.1080/02626667.2015.1083651>. Acesso 17 fev. 2018.
- Rolim, G. S., Sentelhas, P. C., Barbieri, V. 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, [online] 6. Disponível: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/171.pdf>. Acesso 20 fev. 2018.
- Schmidt, D. M., Lima, K. C., & Jesus, E. D. S. 2018. Variabilidade Climática da Disponibilidade Hídrica na Região Semiárida do Estado do Rio Grande do Norte. *Anuario do Instituto de Geociencias*, [online] 41. Disponível: http://10.11137/2018_3_483_491. Acesso 20 ago. 2018.
- Silva, G. J. F.; Oliveira, N. M.; Santos, C. A. G.; Silva, R. M. 2020. Spatiotemporal variability of vegetation due to drought dynamics (2012–2017): a case study of the Upper Paraíba River basin, Brazil. *Natural Hazards*, v. 102, p. 939–964. (doi.org/10.1007/s11069-020-03940-x).
- Sudene. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. 2017. Disponível: <http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/infograficosemiaridodelimitacao.png>. Acesso: 19 abr. 2019.
- Thorhwaite, C., & Matter, J. (1955). The water balance, publication in climatology. Centerton: Drexel Institute of Technology.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, [online] 38. Disponível: <https://www.jstor.org/stable/210739?seq>. Acesso: 23 abr. 2019.
- UNEP – United Nations Environment Programme. 1992. *World Atlas of Desertification*. Londres: Edward Arnold.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. (2007). Section B State-and-Trends of the Environment: 1987–2007, p. 37-192. IN: UNEP. 2007. *Global Environment Outlook GEO 4 environment for development*.
- Varejão-Silva, M. A. *Meteorologia e climatologia*. Brasília: INMET, 2001.
- Vieira, R. M. S. P.; Tomasella, J.; Barbosa, A. A.; Martins, M. A.; Rodriguez, D. A.; Rezende, F. S.; Carriello, F.; Santana, M. O. 2020. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. *Land Degradation & Development – LDD*. (doi.org/10.1002/ldr.3681).
- Zhang, X., Xu, Y., Hao, F., Li, C., Wang, X. 2019. Hydrological Components Variability under the Impact of Climate Change in a Semi-Arid River Basin. *Water*, [online] 11. Disponível: <https://10.3390/w11061122>. Acesso: 17 jan. 2019.