

XVI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
15º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES
DE LÍNGUA PORTUGUESA

**AVALIAÇÃO DO AJUSTE DA CURVA DE BUDYKO PARA BACIAS
HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO**

Jonas Felipe Santos de Souza¹; Alfredo Ribeiro Neto² & Tiago de Moraes Inocêncio³

RESUMO – O presente trabalho avaliou o ajuste da curva de Budyko expresso pelo coeficiente w aplicado na região do Estado de Pernambuco pela equação de Fu, usando como referência as 15 Unidades de Planejamento (UP) da região continental pernambucana e as bacias hidrográficas dos rios Tracunhaem, Tapacurá, Ipojuca, Una e Pajeú. Foram usados dados de precipitação, vazão, evapotranspiração potencial e real. Para as 15 UPs foi utilizada a base de dados ERA5-Land; para as bacias hidrográficas foram utilizados dados de estações de medição e do ERA5. Os resultados mostraram que, para as bacias hidrográficas, os valores de w mostraram tendência de crescimento a partir da Zona da Mata (rio Tracunhaem) até o sertão semiárido (rio Pajeú), expresso como o aumento das taxas de evapotranspiração para regiões mais secas. Para as UPs ocorre o inverso, com valores menores de w para a região semiárida, o que pode refletir uma superestimação dos dados de vazão do ERA5-Land, especialmente na região do semiárido, uma vez que não refletiu o comportamento real do clima.

ABSTRACT– The present work evaluated the adjustment of the Budyko curve expressed by the w coefficient applied in the region of the State of Pernambuco by the Fu's equation, using as reference the 15 Planning Units (PU) of the Pernambuco continental region and the hydrographic basins of the Tracunhaem, Tapacurá, Ipojuca, Una, and Pajeú rivers. Precipitation, runoff, potential and actual evapotranspiration data were used. For the 15 PUs, the ERA5-Land database was used; for the hydrographic basins, data from gauge stations and ERA5 were used. The results showed that, for the hydrographic basins, the w values showed a tendency to increase from the Zona da Mata (Tracunhaem river) to the semi-arid sertão (Pajeú river), expressed as the increase in evapotranspiration rates for drier regions. For the PUs, the opposite occurs, with lower w values for the semi-arid region, which may reflect an overestimation of the ERA5-Land runoff data, especially in the semi-arid region, since it did not reflect the real behavior of the climate.

Palavras-Chave – Hipótese de Budyko, evapotranspiração, balanço hídrico.

¹ Mestrando em Recursos Hídricos pelo PPGECC-UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; jonas.ssouza@ufpe.br

² Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; alfredo.ribeiro@ufpe.br

³ Engenheiro Civil, Engeconsult, rua Almirante Noronha de Carvalho, 141/142 ao fim Rosarinho, Recife-PE; tminocencio@gmail.com

INTRODUÇÃO

A demanda evaporativa em bacias hidrográficas é atendida pela precipitação e interfere diretamente no volume escoado que formará a vazão nos rios. A formulação conhecida como hipótese de Budyko relaciona a taxa de variação da evaporação real com a precipitação (E/P) e a variação da evapotranspiração potencial com a precipitação (E_0/P). Isso permite investigar as interações entre clima, ciclo hidrológico e vegetação. A curva de Budyko pode, ainda, refletir a influência das características da superfície da bacia na resposta da seca hidrológica que sucede a seca meteorológica (HUANG *et al.*, 2017). Com a definição da curva de Budyko, pode-se, também, definir a evapotranspiração real e, por consequência, a vazão média anual a partir da evapotranspiração potencial e precipitação (ZHANG *et al.*, 2004).

O objetivo do estudo foi ajustar a curva de Budyko e calcular o parâmetro w da formulação de Fu (1981) em bacias do Estado de Pernambuco. De forma secundária, objetivou-se verificar a adequabilidade dos dados de reanálises ERA5-Land para a estimativa do parâmetro w da equação de Fu. A aplicação em bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco permitiu verificar o comportamento do parâmetro w da equação de Fu (1981) com relação às características climáticas das bacias, uma vez que o regime de precipitação é distinto quando se compara o sertão semiárido com a zona da Mata e o litoral.

METODOLOGIA

Área de estudo e obtenção dos dados

A área de estudo envolve o Estado de Pernambuco, localizado na região Nordeste do Brasil. Possui área estimada de 98146 km², dos quais aproximadamente 88% possuem clima semiárido, estando boa parte de seu território, portanto, no “Polígono das Secas”. Desse modo, Pernambuco possui clima assinalado por irregularidades espaciais e temporais no regime de chuvas, em que os valores anuais podem variar de 400 mm no Sertão até 2200 mm no Litoral e na Zona da Mata.

De acordo com a mais recente atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH, 2020), o estado foi dividido em 16 Unidades de Planejamento (UP), em que 15 destas compõem a região continental de Pernambuco e foram utilizadas como referência para este estudo. Além disso, também foram consideradas como referência cinco bacias hidrográficas dos seguintes rios: Tracunhaem, Tapacurá, Ipojuca, Una e Pajeú (integrantes das UP01, UP03, UP05,

UP07 e UP11, respectivamente). Toda a composição da área de estudo pode ser vista na Figura 1. A Tabela 1 apresenta os valores das áreas de contribuição para cada uma das regiões analisadas.

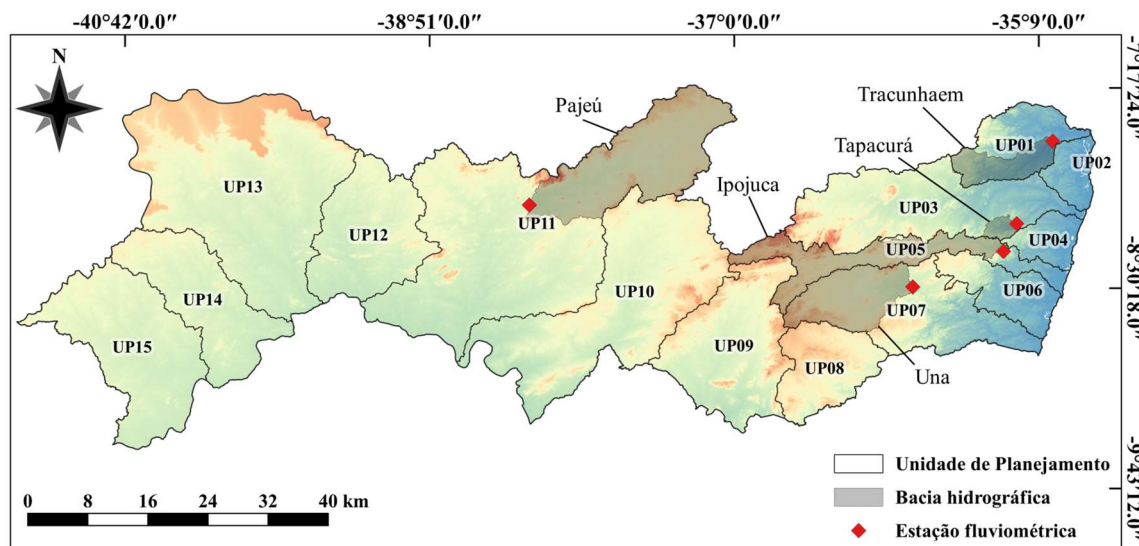


Figura 1 – Composição da área de estudo.

Tabela 1 – Área de contribuição das regiões analisadas.

Região	Área (km ²)	Região	Área (km ²)
UP01	2936,50	UP11	18388,57
UP02	1190,89	UP12	5360,65
UP03	7444,00	UP13	15020,44
UP04	1264,91	UP14	5405,61
UP05	3587,24	UP15	7505,63
UP06	2369,28	Tracunhaem	1230,00
UP07	6344,25	Tapacurá	264,00
UP08	3307,20	Ipojuca	2960,00
UP09	6570,50	Una	2610,00
UP10	11364,02	Pajeú	5910,00

Fonte: Adaptado de PERH (2020) e Inocêncio *et al.* (2021).

Os dados de precipitação, vazão e evaporação potencial para cada uma das 15 UPs foram obtidos da base de dados ERA5-Land (uma repetição do componente terrestre de reanálise climática do ERA5), com resolução de 9 km, cobrindo o período de 1950 a 2021. A reanálise ERA5 é produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasting* (ECMWF). ERA5 é a quinta geração de reanálises do ECMWF e o ERA5-Land é uma evolução que simula com maior detalhe os ciclos de água e energia com melhor resolução espacial (MUÑOZ-SABATER *et al.*, 2021).

Para as cinco bacias hidrográficas foi utilizado o mesmo conjunto de dados do estudo de Inocêncio *et al.* (2021). Os dados de precipitação foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Os dados de temperatura do ar e umidade relativa – usados para o cálculo da evapotranspiração potencial a partir do método de Hargreaves (HARGREAVES, 1974) – foram providos da base de dados ERA5. Por fim, as séries temporais de dados de vazão foram obtidas do banco de dados da ANA (uma estação para cada bacia hidrográfica). Todos estes conjuntos de dados cobrem o período de 1979 a 2018.

Hipótese de Budyko

Considerando que o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica é representado na forma da Equação 1:

$$P = E + Q + \Delta S \quad (1)$$

onde P é a precipitação, E é a evapotranspiração real, Q é a vazão e ΔS é a variação do armazenamento na bacia. Para condições estacionárias, com uma escala de tempo média em que as variações de armazenamento na bacia são muito pequenas – apontada, geralmente, como o período de um ano –, admite-se que ΔS seja zero. Com isso, a partir dos dados de precipitação P e vazão Q obtidos para todas as regiões da área de estudo deste trabalho foi possível encontrar os valores de evapotranspiração real reorganizando os fatores chegando à formulação da Equação 2:

$$E = P - Q \quad (2)$$

A evapotranspiração real é limitada pela disponibilidade hídrica. Entretanto, em uma situação ideal de disponibilidade infinita – isto é, quando não há um limite imposto –, a evapotranspiração atinge seu valor máximo, denominando-se evapotranspiração potencial E_0 . Segundo Zhang *et al.* (2004), sobre condições de umidade, quando $P \gg E_0$, a evapotranspiração real tende à E_0 e não deve aumentar com a precipitação P , uma vez que nestas condições E é limitada por E_0 . Por outro lado, em condições áridas, em que $P \ll E_0$, a evapotranspiração real tende à P , e seu limite é imposto pela disponibilidade hídrica.

A dificuldade em calcular a evapotranspiração real fez com que diversas formulações empíricas e teóricas fossem desenvolvidas a fim de estimar seus valores. Assim, de acordo com a hipótese formulada por Budyko (1974), mudanças na E podem ser induzidas por P e E_0 de modo que a razão entre a evapotranspiração real e a precipitação (E/P) é determinada pelo índice de aridez, definido como a razão entre a evapotranspiração potencial e a precipitação (E_0/P). Baseado nessa hipótese, a

Equação 3 proposta por Fu (1981) foi adotada para este estudo a fim de ajustar a curva de Budyko aos dados observados:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^w \right]^{1/w} \quad (3)$$

onde w é um parâmetro do modelo. O método do gradiente reduzido generalizado (GRG) não linear disponível na ferramenta Solver do Microsoft Excel foi utilizado para a estimativa do parâmetro w em que a função objetivo consistiu no somatório da diferença absoluta os dois lados da Equação 3. O parâmetro w pode ser considerado como a representação dos efeitos integrados das características da bacia hidrográfica sobre a evapotranspiração (ZHANG *et al.*, 2004). A relação expressa pela Equação 3 é mostrada na Figura 1 e sua formulação teórica pode ser encontrada em Zhang *et al.* (2004).

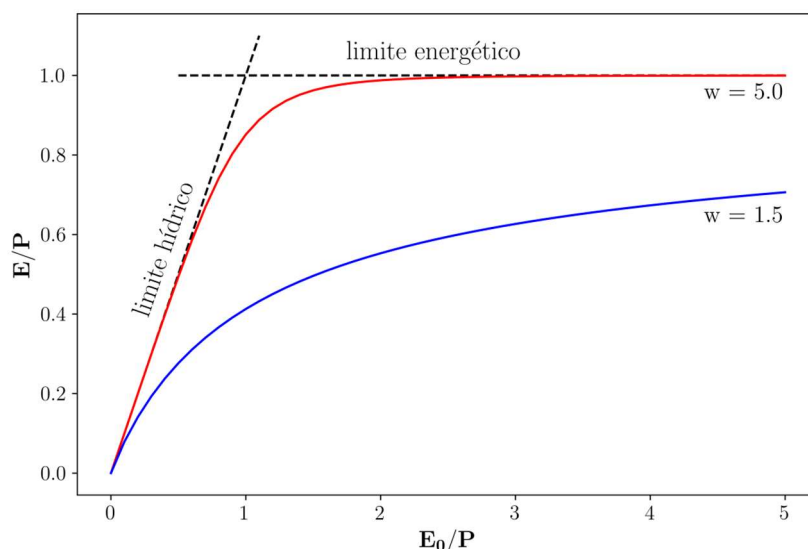


Figura 2 – Curva de Budyko.

RESULTADOS

A Figura 3 apresenta as curvas de Budyko ajustadas para cada uma das Unidades de Planejamento e das bacias hidrográficas. Além disso, também é apresentada a distribuição espacial dos dados do ERA5-Land e observados pela relação entre E/P anual e E_0/P anual.

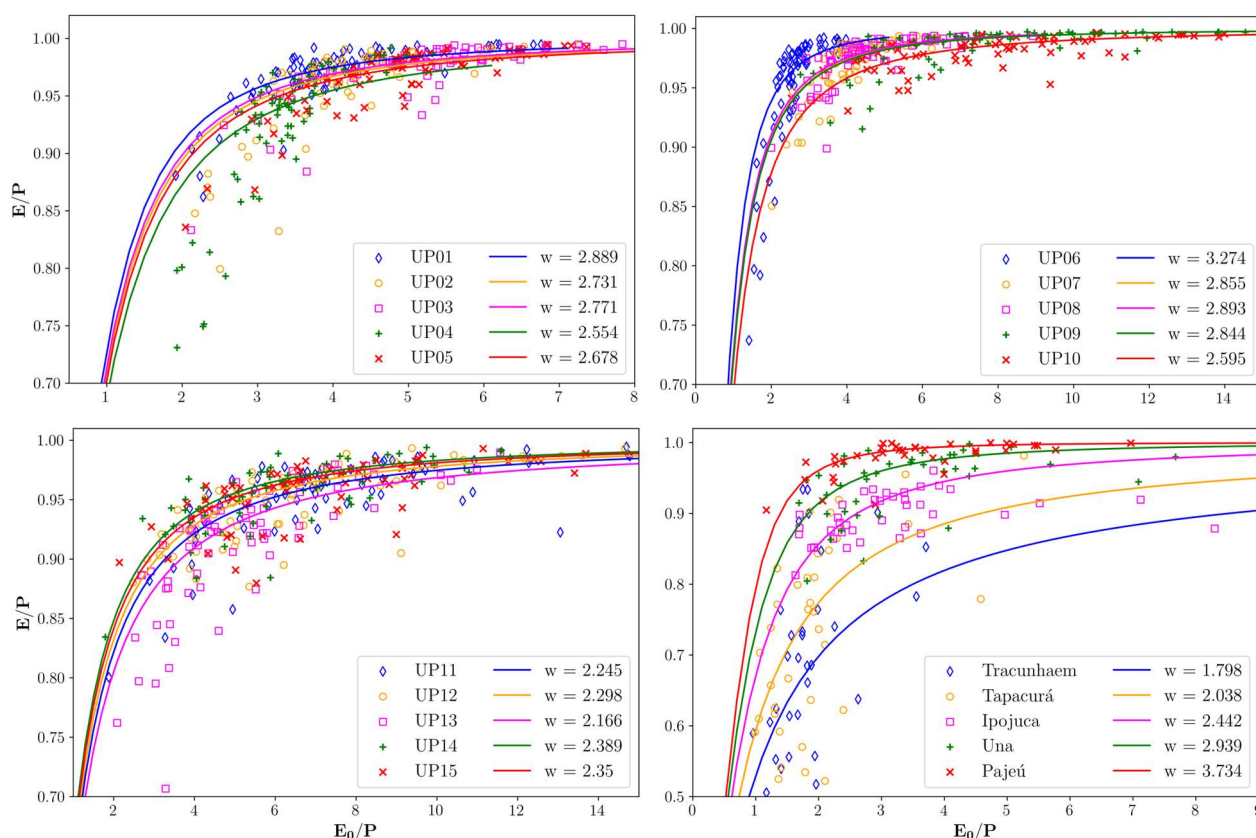


Figura 3 – Relação entre E/P anual e E_0/P anual nas regiões da área de estudo.

A partir da Figura 3 é possível notar que as curvas de Budyko da UP01 à UP10 estão melhores ajustadas em relação à distribuição dos dados do ERA5-Land. As demais UPs apresentaram distribuição menos homogênea, ainda que os valores de w estejam próximos um do outro. É possível notar ainda que, movendo-se entre as Unidades de Planejamento de leste a oeste, há uma diminuição progressiva do parâmetro w e, portanto, um rebaixamento da curva de Budyko. No geral, o ajuste de curvas para as 15 UPs apresentou resultado bastante homogêneo com w alcançando desvio padrão de 0,30 e valor médio de 2,64.

Observando a disposição dos resultados para as cinco bacias hidrográficas. Estas apresentaram visualmente pouca homogeneidade, com distribuição de dados observados bastante dispersa. No entanto, quando considerado o ajuste das curvas de Budyko, a bacia do Pajeú apresentou a melhor configuração e alcançou um valor de w igual a 3,734, o maior dentre as cinco bacias. Embora este conjunto de dados tenha alcançado um coeficiente w médio de 2,59 – bastante próximo ao valor obtido pelas UPs –, seu desvio padrão foi de 0,77, o que significa maior dispersão quando comparado ao conjunto de dados anterior.

Levando-se em conta a convergência de localidade entre bacias hidrográficas e Unidades de Planejamento para fins de comparação, é possível notar que os valores de w das bacias dos rios Una

e Ipojuca possuem boa uniformidade com as Unidades das quais fazem parte (UP07 e UP05, respectivamente). Por outro lado, a maior diferença está entre a bacia do rio Pajeú e a UP11 (com diferença absoluta de w igual a 1,49), seguida da diferença entre a bacia do rio Tracunhaem e a UP01.

Do ponto de vista hidrológico, os trabalhos de Zhang *et al.* (2004) e Caracciolo *et al.* (2018) mostraram que para regiões cujas propriedades climáticas e de bacia não são favoráveis à evapotranspiração – isto é, alta intensidade de precipitação, sazonalidade, grande capacidade de armazenamento de água no solo etc. –, uma parte maior da precipitação torna-se vazão, no que é expresso em valores menores de w . Isso está em concordância com os resultados obtidos nas cinco bacias hidrográficas em que se utilizaram dados observados de precipitação e vazão. Nessas bacias, o parâmetro w assumiu valores crescentes a partir da Zona da Mata (rio Tracunhaém) até o sertão semiárido (rio Pajeú). Por outro lado, esse comportamento não foi verificado nas UPs em que foram utilizados dados do ERA5-Land, ou seja, houve uma tendência de valores mais baixos de w no Sertão e maiores na zona da Mata e Litoral. Com isso, supõe-se que os valores de vazão do ERA5-Land podem estar superestimados, especialmente na região do semiárido, dadas suas condições climáticas e meteorológicas.

A heterogeneidade observada entre os resultados apresentados das 15 UPs e das cinco bacias hidrográficas deve-se principalmente às diferentes bases de dados utilizadas. Uma vez que os dados obtidos para as bacias são, em grande parte, providos de estações de medição *in situ*, enquanto que para as Unidades de Planejamento foram obtidos por produtos de reanálise.

A Equação 3 também foi usada para calcular a evapotranspiração real das cinco bacias a partir dos dados de precipitação e evapotranspiração potencial. Uma comparação da evapotranspiração observada e calculada é mostrada na Figura 4.

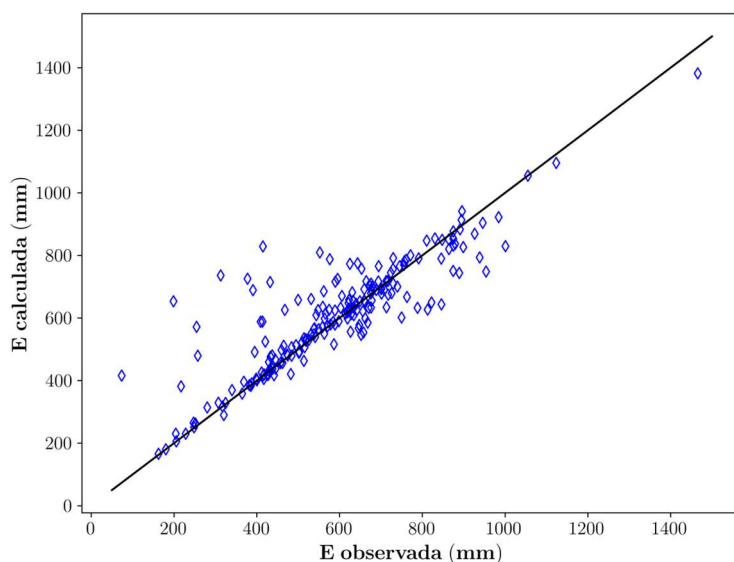


Figura 4 – Comparação entre E calculada e observada para as cinco bacias hidrográficas.

Para a comparação foram usados três valores de w : (1) média entre os parâmetros w das bacias dos rios Tracunhaem e Tapacurá; (2) média entre os parâmetros w das bacias dos rios Ipojuca e Una; e (3) parâmetro w da bacia do rio Pajeú. Os resultados mostraram que a melhor correlação entre E calculada e observada foi obtida para a bacia do rio Pajeú, com R^2 de 0,994 e erro absoluto médio (MAE – *mean absolute error*) de 9,16 mm. Para as bacias dos rios Ipojuca e Una foram encontrados R^2 de 0,974 e MAE de 21,94, obtidos a partir do parâmetro w médio. Os piores resultados são os das bacias dos rios Tracunhaem e Tapacurá, com R^2 de 0,343 e MAE de 114,63.

CONCLUSÕES

Dados observados de precipitação e vazão mostraram-se adequados para a aplicação da curva de Budyko em bacias com diferentes características climáticas em Pernambuco, exceção para a bacia do rio Tracunhaém em que a correlação do ajuste ficou abaixo das demais bacias. Os valores obtidos do parâmetro w são compatíveis com os descritos em outros estudos, em que áreas mais úmidas apresentam valores mais baixos que as regiões mais secas. No caso das bacias deste estudo, Tracunhaém e Tapacurá na zona da Mata tiveram valores de w inferiores a Una e Pajeú.

Os dados de reanálises ERA não se mostraram compatíveis com os resultados obtidos com os dados observados. Por esse motivo, necessitam de melhor avaliação e, caso seja viável, passar por correção de tendência antes da aplicação do método de Budyko.

Uma vez que se defina valores médios para grupos de bacias com características semelhantes de clima e cobertura vegetal, pode-se aplicar o método de forma simples para determinar a evapotranspiração real e a vazão nas bacias a partir de valores médios de precipitação e evapotranspiração potencial. Além disso, a curva de Budyko pode ser utilizada na avaliação da sensibilidade da bacia frente a alterações do regime de precipitação, aspecto importante diante de potenciais alterações decorrentes das mudanças do clima.

AGRADECIMENTOS

Este estudo é uma contribuição de projeto financiado pela chamada CNPq/MCTI N° 23/2020 – processo 441951/2020-1. O primeiro autor é bolsista de mestrado da Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE).

REFERÊNCIAS

BUDYKO, M. I. *Climate and Life*. Academic, San Diego, California, 1974.

CARACCILO, D.; PUMO, D.; VIOLA, F. Budyko's Based Method for Annual Runoff Characterization across Different Climatic Areas: an Application to United States. *Water Resources Management*, v. 32, p. 3189–3202, 2018.

FU, B. P. On the calculation of the evaporation from land surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, v. 5, p. 23-31, 1981.

HARGREAVES, G. H. Estimation of potential crop evapotranspiration. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 17, p. 701-704, 1974.

HUANG, S. *et al.* The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 184–195, 2017.

INOCÊNCIO, T. M. *et al.* Linking drought propagation with episodes of climate-induced water insecurity in Pernambuco state – northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 193, 2021.

MUÑOZ-SABATER, J. *et al.* ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, v. 13, p. 4349–4383, 2021.

PERH – Governo do Estado de Pernambuco. 2020. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH/PE. *Produto 3 – Diagnóstico*. Disponível em: < <https://www.perhpe.com.br/>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

ZHANG, L. *et al.* A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, v. 40, n. W02502, 2004.