

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE

É POSSÍVEL ESTIMAR SÉRIES ANUAIS DE VAZÃO EM BACIAS NÃO MONITORADAS UTILIZANDO EQUAÇÕES BASEADAS NAS HIPÓTESES DE BUDYKO?

Rodrigo Gomes Otsuki¹ ; Maria Elisa Leite Costa² & Dirceu S. Reis Jr.³

RESUMO – Equações analíticas, baseadas nas hipóteses de Budyko, são usualmente utilizadas para estimar vazões médias de longo período em bacias sem dados de vazão. Este artigo avalia o desempenho dessas equações em escalas temporais mais refinadas, para estimar séries anuais de vazão, que poderiam reduzir incertezas nas estimativas regionais de parâmetros de modelos hidrológicos em bacias não monitoradas. O estudo foi aplicado em 16 bacias localizadas no semiárido cearense empregando a equação de Fu, de apenas um parâmetro (ω). A utilização de um valor único de ω para o estado produziu resultados inadequados, indicando a necessidade de entender como ω varia na região. O estado foi então dividido em duas regiões, Norte e Sul. Em 50% das estações na Região Norte, o erro relativo na estimativa da vazão média de longo período foi menor do que 10%, e o maior erro foi de 22%. Estimativas das séries anuais de vazão forneceram valores de Nash-Sutcliffe (Região Norte) acima de 0,60 em 7/8 das estações, e acima de 0,85 em duas delas. Resultados na Região Sul não foram bons, o que mostra a necessidade de se construir um modelo regional de ω .

ABSTRACT– Analytic equations, based on Budyko hypothesis, are often used to estimate long-term mean annual streamflow at ungauged basins. This paper evaluates the performance of these equations at shorter time scales, such as to estimate interannual streamflow series, which can be potentially used to increase the precision of regional estimates of parameters of conceptual hydrologic models. The study employed the one-parameter Fu's equation at 16 basins in the semiarid region of state of Ceará. The use of a regional mean value for parameter ω for the whole state provided unreasonable results, which shows that one needs to understand the spatial variability of ω . The state was then divided into two regions, North and South. In the North region, the relative errors of the estimated long-term mean annual flows were less than 10% in 50% of gauges, with a maximum value of 22%. Estimation of interannual flow series for the North region provided Nash-Sutcliffe efficiency values greater than 0,60 in 7/8 of 8 gauges, and greater than 0,85 in two. Unreasonable results for the South region indicate the need to build a regional model for ω .

Palavras-Chave – bacias não monitoradas, vazão, balanço de energia.

1) Engenheiro Civil da Prime Projetos e Consultoria e aluno especial do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da Universidade de Brasília. ENC/FT, Prédio SG12, Térreo, Universidade de Brasília, Campus Universitário – Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília – DF, rodrigo@primeprojetos.com.

2) Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da Universidade de Brasília, ENC/FT, Prédio SG12, Térreo, Universidade de Brasília, Campus Universitário – Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília – DF, mariaelisa@unb.br,

3) Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da Universidade de Brasília. ENC/FT, Prédio SG12, Térreo, Universidade de Brasília, Campus Universitário – Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília – DF, dirceureis@unb.br.

1- INTRODUÇÃO

Existe uma relação clara entre o balanço hídrico e o balanço de energia numa dada bacia hidrográfica. Em escalas temporais suficientemente longas, de forma que seja possível desconsiderar as variações do armazenamento de água na bacia, pode-se afirmar que a média de longo período das vazões anuais (Q) é igual à diferença entre as médias anuais de longo período da precipitação (P) e da evapotranspiração (E), sendo E um dos principais componentes do balanço de energia, junto com o fluxo de calor sensível (H). Nessas escalas de tempo, é razoável admitir que o fluxo de radiação líquida disponível na superfície terrestre (R_n) será transformado em fluxo de calor latente de evaporação ($L_e E$) e fluxo de calor sensível (H), de forma que $R_n = L_e E + H$, sendo L_e o calor latente de vaporização da água.

Budyko (1974) apresentou uma análise bastante elucidativa das relações entre Q e os componentes básicos do balanço de energia em escalas temporais longas, que acabou se tornando a base sobre a qual modelos mais sofisticados foram desenvolvidos. A análise desenvolvida por Budyko baseou-se em duas condições extremas, uma na qual a bacia se encontra em condições de alta aridez, onde a radiação líquida disponível, em unidade de lâmina d'água evaporada, (R_n/L_e), é muito maior do que P , ou seja, $R_n/(L_e P) \gg 1$, e outra na qual a bacia se encontra numa situação de umidade abundante, quando $R_n/(L_e P) \ll 1$. Ele mostrou que em condições de aridez alta, a relação E/P fica limitada pela quantidade de água disponível na bacia ($E/P = 1$), enquanto que na condição de umidade abundante, a relação E/P fica limitada pela energia disponível para evaporação, de modo que $E/P = R_n/(L_e P)$.

A análise dessas duas situações limites, em conjunto com observações em diversas bacias hidrográficas, permitiu a construção de uma equação que relaciona E/P (ou Q/P) com $R_n/(L_e P)$ (ou E_0/P , sendo E_0 a evapotranspiração potencial), propiciando assim, para uma dada bacia hidrográfica, a possibilidade de se estimar a média de longo período de E (ou de $Q = P - E$) com base apenas em P e E_0 , mesmo que não haja monitoramento de vazões,. Esse modelo costuma ser chamado na literatura de modelo de Budyko, equação de Budyko, ou ainda de hipóteses de Budyko.

É importante chamar a atenção para o fato de que apenas fatores relacionados à energia são considerados na análise, ficando de fora fatores conhecidamente importantes no processo de evaporação da bacia, como por exemplo, características da vegetação, do solo e da própria precipitação. De todo modo, em bacias grandes, onde é razoável supor que os fatores ligados ao balanço de energia sejam mais importantes, os resultados apresentados por Budyko (1974) mostram

que as estimativas de E , ou Q , obtidas pelo modelo são próximas aos valores observados em diversas bacias européias.

Mais recentemente, alguns estudos procuraram reavaliar as hipóteses de Budyko, tentando entender como outros fatores poderiam ser incluídos na análise. Por exemplo, Milly (1994), com base no modelo de Budyko, chegou à conclusão que além do índice de aridez, representado por E_0/P , outras grandezas possuem papel relevante, como por exemplo, a razão entre a capacidade de armazenamento de água do solo e P , o número médio de eventos de chuva por ano, a taxa de chegada de eventos chuvosos, e a sazonalidade das chuvas. Zhang *et al.* (2001) procuraram entender e modelar o papel da vegetação nos processos envolvidos e desenvolveram um modelo de dois parâmetros.

Mais tarde, Zhang *et al.* (2004), baseados em Fu (1981, apenas em chinês), desenvolveram uma expressão analítica que mostra como as características do clima e da bacia hidrográfica interferem na repartição de P em Q e E . A abordagem empregada por Fu (1981), e seguida por Zhang *et al.* (2004), emprega os conceitos levantados por Budyko (1974), mas utiliza apenas métodos matemáticos para derivar a equação final, se diferenciando de outras abordagens empíricas publicadas anteriormente, ou até mesmo da equação sugerida por Budyko (1974), considerada semi-

empírica. Essa expressão final, $\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega}$, denominada aqui de equação de Fu,

possui um parâmetro, ω , que está supostamente relacionado com características da bacia. O modelo foi aplicado em mais de 470 bacias hidrográficas em diferentes regiões climáticas do mundo, e os resultados apresentaram boa relação com os valores observados de E , com coeficiente de correlação de 0,89, sendo que os valores de ω variaram entre 1,7 e 5,0. Os autores tentaram relacionar os valores de ω com características das bacias, tais como, percentual da área sob determinada cobertura vegetal e capacidade de armazenamento do solo, mas não encontraram nenhuma relação estatisticamente significativa. Entretanto, verificou-se que ω variava com a lâmina precipitada média em dias chuvosos e com o coeficiente de variação das chuvas diárias. Estimando ω para cada bacia com base nessas variáveis explanatórias, eles foram capazes de reduzir em 16% o erro padrão na estimativa de E , quando comparado com os resultados obtidos por meio do valor médio de ω .

Mais tarde, Yang *et al.* (2008) desenvolveram uma nova equação analítica baseada em análise dimensional e raciocínio matemático, $\frac{E}{P} = \frac{E_0}{(P^n + E_0^n)^{1/n}}$, e verificaram que o parâmetro n é

linearmente correlacionado com o parâmetro ω da equação de Fu, mostrando que as equações são praticamente equivalentes.

A estimativa de valores médios de longo período de Q e E são importantes para dar uma idéia geral do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, permitindo, por exemplo, determinar o limite superior de regularização de um rio por meio da implantação de uma barragem. Além disso, com a crescente preocupação em entender como o ciclo hidrológico será alterado devido a possíveis mudanças do clima, abordagens baseadas nas hipóteses de Budyko vêm sendo empregadas para determinar a sensibilidade das vazões de um rio a mudanças na temperatura e nas precipitações sobre uma bacia hidrográfica (Nemec e Schaake, 1982; Dooge, 1999; Sankarasubramanian et al., 2001; Arora, 2002; Niemann, 2005; Fu et al., 2007; Wang et al., 2008; Fu et al., 2009; Reneuer et al., 2011; Roderick e Farquar., 2011; Yang e Yang, 2011; Donohue et al., 2012).

Embora seja uma informação importante em estudos hidrológicos e de recursos hídricos, valores médios de longo período de Q e E não fornecem uma idéia do grau de variabilidade dessas variáveis ao longo do tempo, informação imprescindível para a adequada gestão da água. Alguns estudos procuraram aperfeiçoar modelos baseados nas hipóteses de Budyko para estimar a vazão ou a evapotranspiração em escalas temporais mais refinadas, sugerindo modelos hidrológicos mais complexos, mas que ajudaram no entendimento dos processos envolvidos, como em Zhang et al. (2008) e Gerrits et al. (2009), que chegaram a desenvolver modelos nas escalas diárias e mensal, respectivamente.

A estimativa de séries de vazões em escalas temporais anual e mensal, a partir de modelos ou equações baseadas nas hipóteses de Budyko, podem ter um papel importante em problemas de predição em bacias não monitoradas. Uma das maneiras de estimar séries de vazões diárias ou mensais em locais sem dados de vazão consiste em utilizar modelos hidrológicos conceituais do tipo chuva-vazão. A dificuldade deste tipo de abordagem está em determinar o conjunto adequado de parâmetros para o local, já que não é possível recorrer ao procedimento usual de calibração. A estratégia usualmente empregada faz uso de dados de vazão em estações fluviométricas da região, cujos dados são utilizados para calibrar o modelo. Com base em uma análise de regressão, os parâmetros do modelo são relacionados com características climáticas e fisiográficas das bacias. Os resultados deste tipo de abordagem nem sempre são adequados. Qualquer informação sobre as vazões no local de interesse tende a trazer um ganho de qualidade para este tipo de abordagem, sendo esta uma aplicação promissora das equações baseadas na hipótese de Budyko. Por exemplo, séries anuais de vazão no local de interesse (sem dados de vazão), estimadas com base em informações meteorológicas (por exemplo, equação de Fu), poderiam ser empregadas, em conjunto com a análise de regressão dos parâmetros, para determinar o conjunto ótimo de parâmetros do modelo. Se a informação oriunda destas equações (baseadas em Budyko) representam um ganho qualitativo na determinação dos parâmetros de modelos hidrológicos em locais sem dados de vazão

é algo que ainda preciso ser avaliado. O passo inicial dessa avaliação consiste em verificar quão bem essas equações representam séries de vazão a nível anual.

O objetivo específico do presente estudo é avaliar se equações baseadas nas hipóteses de Budyko, como a equação de Fu, são capazes de estimar adequadamente séries anuais de Q ou E em bacias não monitoradas, e identificar os principais desafios para trabalhar com escalas temporais mais refinadas. O projeto de pesquisa ainda está em andamento, sendo que o artigo apresenta os primeiros resultados obtidos para bacias hidrográficas localizadas no semiárido cearense. Estudos desta natureza foram realizados na Austrália e na China (Yang *et al.*, 2007; Potter *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2011).

O artigo segue com uma descrição da formulação teórica sobre a qual se baseiam as diversas equações baseadas nas hipóteses de Budyko, focando no desenvolvimento da equação de Fu, que foi empregada no estudo. Em seguida apresentam-se a descrição dos dados utilizados, seguidos dos resultados obtidos, com uma discussão sobre o desempenho da equação de Fu em estimar a vazão média de longo período e séries de vazões anuais, incluindo hipóteses a serem avaliadas no futuro que expliquem o comportamento em algumas bacias. Ao final são apresentadas as principais conclusões do estudo.

2- FORMULAÇÃO TEÓRICA

2.1 O modelo de Budyko

Como já foi dito anteriormente, Budyko (1974) partiu de duas situações extremas para desenvolver sua análise que identificou a relação entre as médias de longo período de P e Q com componentes do balanço de energia, uma situação extremamente árida e outra com umidade abundante. Partindo do pressuposto que a umidade média do solo diminui à medida que a radiação líquida disponível (R_n/L_e) aumenta e a precipitação P diminui, o solo passa a ter uma capacidade maior de absorver o total precipitado, resultando numa diminuição do volume escoado. Quando o índice de aridez tende ao infinito, a evapotranspiração da bacia irá se aproximar do total precipitado. Diz-se, neste caso, que a evapotranspiração é limitada pela quantidade de água disponível. Do ponto de vista matemático, a situação de aridez extrema é representada da seguinte forma,

$$\lim_{\frac{R_n}{L_e P} \rightarrow \infty} \frac{E}{P} = 1 \quad (1)$$

Por outro lado, quando o índice de aridez diminui ($R_n/(L_e P)$), o teor médio de umidade do solo tenderá a aumentar, e os valores de E/P tendem a diminuir, resultando num aumento do volume escoado. Portanto, à medida que radiação líquida disponível diminui e as taxas de precipitação

aumentam, haverá um aumento da umidade média do solo, de forma que no limite em que o índice de aridez tende a zero, haverá uma umidade abundante nas camadas superficiais do solo. Neste caso de umidade abundante, a taxa de evaporação estará relacionada com a energia disponível para evaporar a água. Diz-se, neste caso, que a evapotranspiração é limitada pela energia disponível. Matematicamente, a situação de umidade abundante é representada da seguinte forma,

$$\lim_{\frac{R_n}{L_e P} \rightarrow 0} \frac{E}{P} = \frac{R_n}{L_e P} \quad (2)$$

Com base nessas duas situações extremas, Budyko (1974) propôs que

$$\frac{E}{P} = \Phi \left(\frac{R_n}{L_e P} \right) \quad (3)$$

sendo necessário definir a função Φ . Estudos anteriores (Schreiber, 1904; Ol'dekop, 1911), baseados em análises puramente empíricas, já haviam proposto algo parecido, conforme indicado pelo próprio Budyko. A equação final proposta por Budyko, baseada nas condições definidas pelas eqs. (2) e (3), em conjunto com dados observados em diversas bacias europeias, é apresentada abaixo,

$$\frac{E}{P} = \left\{ \frac{E_0}{P} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_0}{P} \right) \right] \operatorname{tgh} \left(\frac{P}{E_0} \right) \right\}^{1/2} \quad (4)$$

sendo tgh a tangente hiperbólica e E_0 a evapotranspiração potencial, que está representando a máxima radiação líquida disponível que seria utilizada para evaporar a água. Pode-se verificar que a eq.(4) respeita as condições impostas pelas eqs. (2) e (3), como pode ser observado na Figura 1.

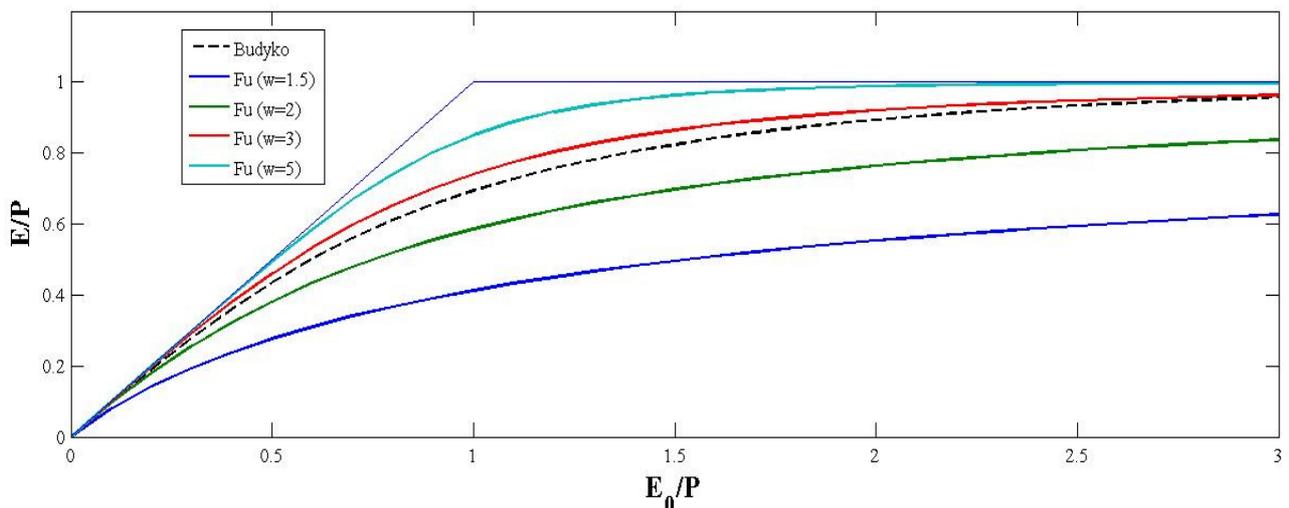


Figura 1: Relação E/P em função de E_0/P conforme a equação de Budyko (linha tracejada) e a equação de F_u para diferentes valores do parâmetro ω .

2.2 A equação de Fu

Zhang et al. (2004), baseados em Fu (1981), apresentaram a derivação de uma equação totalmente analítica, que relaciona E/P com E_0/P , denominada aqui de equação de Fu. Esta equação possui um parâmetro, que está supostamente englobando todos os fatores ou características da bacia que possuem relação com o processo de repartimento da precipitação em evaporação e vazão. Toda análise é feita para escalas temporais suficientemente longas para que seja possível desprezar as variações de armazenamento de água dentro da bacia.

A análise se baseia nas seguintes observações referentes aos termos $\partial E / \partial P$ e $\partial E / \partial E_0$. Para um dado valor fixo de E_0 , $\partial E / \partial P$ aumenta com $(E_0 - E)$ e diminui com P , enquanto que para um dado valor fixo de P , $\partial E / \partial E_0$ aumenta com $(P - E)$ e diminui com E_0 . Com base nessas observações e em análise dimensional, Zhang et al. (2004) chegaram às seguintes formulações,

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \phi_1 \left(\frac{E_0 - E}{P} \right) \quad \text{e} \quad \frac{\partial E}{\partial E_0} = \phi_2 \left(\frac{P - E}{E_0} \right) \quad (5)$$

sendo ϕ_1 e ϕ_2 funções das variáveis adimensionais $(E_0 - E)/P$ e $(P - E)/E_0$, respectivamente. A questão é como definir as funções ϕ_1 e ϕ_2 . Para isto, é necessário entender as condições de contorno do problema.

Em condições de umidade abundante, E é limitada por E_0 , de forma que não varia com P , ou seja, quando a variável adimensional $(E_0 - E)/P$ tende para zero, o termo $\partial E / \partial P$ tende também para zero. Essa é uma condição de contorno do problema que a função ϕ_1 , ainda a ser definida, deve respeitar. Por outro lado, em condições de alta aridez, $E = P$, e não varia com E_0 , ou seja, quando o termo $(P - E)/E_0$ tende para zero, o termo $\partial E / \partial E_0$ também tende para zero. Essa é uma outra condição de contorno do problema que a função ϕ_2 deve respeitar.

Com base na eq. (5) e nas condições de contorno identificadas acima, Zhang et al. (2004) chegaram à equação de Fu,

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (6)$$

sendo ω o parâmetro da equação. A Figura 1 ilustra a equação de Fu para diferentes valores de ω .

3- DADOS EMPREGADOS

Foram utilizadas neste trabalho 16 bacias hidrográficas com características semiáridas do estado do Ceará, cujas áreas de drenagem variam aproximadamente entre 590 a 20.700 km². Todas as bacias são monitoradas por estações fluviométricas localizadas em seus exutórios.

A Figura 2 ilustra as regiões estudadas e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as informações das bacias, bem como o número de anos com disponibilidade de dados.

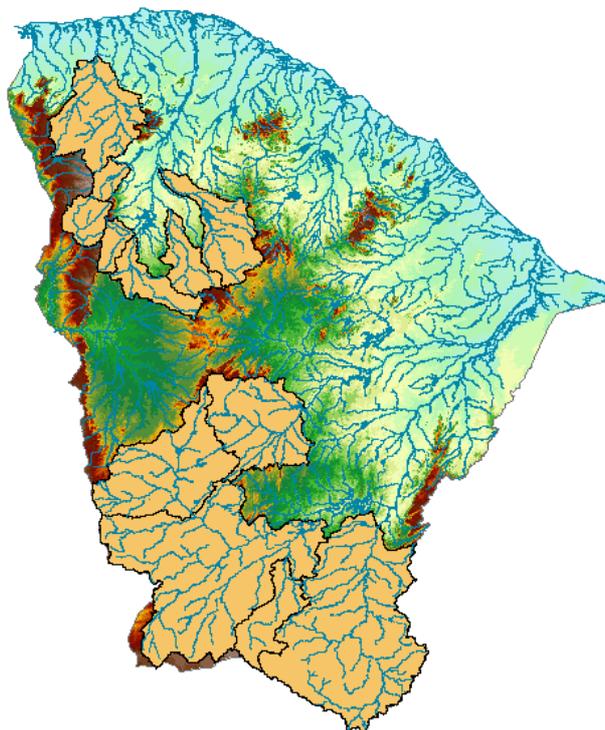


Figura 2 - Ceará - Bacias estudadas

Tabela 1 - Estações fluviométricas consideradas

Estação	Nome	Rio	Área de Drenagem (km ²)	Disponibilidade de dados (anos)
34730000	Croatá	Macabira	1.062	34
35125000	Moraujo	Coreau	1.501	14
35170000	Granja	Coreau	3.967	26
35210000	Fazenda Cajazeiras	Acaraú	1.567	17
35223000	Flores	Jatobá	693	9
35240000	Trapiá	Riacho dos Macacos	1.533	23
35260000	Groairas	Groairas	2.876	19
35263000	Ararius	Jaibaras	588	23
36020000	Arneiroz	Jaguaribe	5.852	55
36125000	Sítio Poço Dantas	dos Bastiões	3.533	30
36130000	Cariús	Cariús	2.043	20
36160000	Iguatu	Jaguaribe	20.664	69
36220000	Jati	Riacho Jardim	1.565	10

Estação	Nome	Rio	Área de Drenagem (km ²)	Disponibilidade de dados (anos)
36250000	Podimirim	Riacho dos Porcos	4.241	19
36290000	Icó	Salgado	12.382	30
36470000	Senador Pompeu	Banabuiu	4.551	53

Os dados precipitação média mensal sobre as bacias hidrográficas utilizadas no estudo foram obtidos do sítio da FUNCEME, e de um estudo da mesma instituição, realizado em parceria com a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do estado do Ceará (COGERH), consubstanciado em Barros (2012). As séries mensais de precipitação média nas bacias foram calculadas utilizando o método de Thiessen, empregando dados de postos da FUNCEME e da extinta SUDENE.

A determinação dos períodos empregados neste estudo se basearam em Barros (2012), que identifica os anos de construção de grandes reservatórios. Períodos sob influência de reservatórios construídos a montante dos exutórios das bacias, que interferem no regime fluviométrico natural dos rios, foram descartados. Anos com falhas nos dados de vazão em meses típicos de período úmido também foram excluídos do estudo.

No início do estudo, a evapotranspiração potencial havia sido calculada com base em dados diários das estações climatológicas do INMET, empregando o método de Hargreaves. Entretanto, verificou-se que devido ao número elevado de falhas das medições de temperatura, o número de anos a serem utilizados no estudo seria reduzido drasticamente. Como a variação interanual da evapotranspiração potencial é pequena, quando comparada com a variação da precipitação, decidiu-se trabalhar com a evapotranspiração potencial de longo período, procedimento adotado em outros estudos publicados na literatura (Potter e Zhang, 2009). A evapotranspiração potencial de cada bacia foi estimada também aplicando o método de Thiessen, levando em consideração os dados disponíveis na publicação “Normais Climatológicas do Brasil 1961 -1990”, do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

A evapotranspiração real (E), empregada no estudo de avaliação de desempenho, foi calculada a partir do balanço hídrico, ou seja, pela diferença entre a precipitação e a vazão observadas nas escalas anuais ($E = P - Q$).

4- RESULTADOS

4.1 Média de longo período

A Tabela 2 apresenta os valores médios de longo período de E , P , E_0 , e os valores ajustados do parâmetro ω da equação de Fu para cada uma das bacias hidrográficas estudadas.

Em onze estações, 70% do total, os valores de ω variaram entre 2,0 e 2,5. Para as cinco estações restantes, sendo a maioria localizada nas bacias do Alto Jaguaribe e Salgado, o valor de ω variou entre 2,5 e 3,7, sendo que uma estação, localizada na cabeceira da bacia do Rio Salgado, apresentou um valor de ω bastante elevado, 5,5.

A fim de avaliar a possibilidade de utilizar a equação de Fu com um valor único para toda a região do estado, ajustou-se o valor de ω para todas as estações ao mesmo tempo, procurando minimizar os resíduos quadráticos em relação ao termo E/P . Neste caso, o valor obtido para o parâmetro da equação de Fu para toda a região foi igual a 2,45, $\omega_{\text{região}} = 2.45$, resultando num erro absoluto médio de 41,8 mm, considerado bastante elevado. Apenas em 50% das estações os erros relativos foram menores que 25%.

Tabela 2: Resultados do ajuste do parâmetro ω da equação de Fu para estimativas de médias de longo período.

Estação	Nº de Anos	Média de Longo Período (mm)			E/P	E_0/P	ω
		E	P	E_0			
34730000	34	675,7	784,8	1993,0	0,861	2,539	2,22
35125000	14	855,7	1003,3	1926,0	0,853	1,920	2,47
35170000	26	927,3	1176,0	1926,0	0,789	1,638	2,30
35210000	17	734,2	915,4	1960,3	0,802	2,141	2,09
35223000	9	762,7	996,8	1960,3	0,765	1,967	2,02
35240000	23	589,9	655,0	1952,8	0,901	2,981	2,32
35260000	19	696,7	802,0	1810,8	0,869	2,258	2,38
35263000	23	850,0	1098,2	1926,0	0,774	1,754	2,15
36020000	55	534,6	572,3	1929,0	0,934	3,370	2,48
36125000	30	741,7	781,2	1795,4	0,949	2,298	3,16
36130000	20	782,6	933,8	1905,2	0,838	2,040	2,31
36160000	69	624,2	661,4	1864,5	0,944	2,819	2,77
36220000	10	879,5	885,2	1884,0	0,994	2,128	5,46
36250000	19	874,1	906,7	1884,0	0,964	2,078	3,71

Estação	Nº de Anos	Média de Longo Período (mm)			E/P	E_0/P	ω
		E	P	E_0			
36290000	30	866,6	941,9	1920,2	0,920	2,039	2,96
36470000	53	652,5	739,0	2016,9	0,883	2,729	2,28

Os resultados indicam que um valor médio de ω para toda a região não é adequado, sendo importante avaliar se existe um padrão de variação espacial de ω no estado do Ceará. Isto poderia ser feito através de um estudo de regionalização, baseada em características fisiográficas e de chuva das bacias hidrográficas, o que será feito no futuro.

No estágio atual do estudo, as estações foram separadas em duas regiões, uma que engloba a parte mais ao sul do Estado do Ceará, contemplando as bacias do Alto Jaguaribe e do rio Salgado, denominada aqui de Região Sul, e outra que contempla o restante das estações, denominada de Região Norte.

Os resultados de ajuste de ω para as duas regiões estão apresentados na Tabela 3. A Figura 3 mostra a curva da equação de Fu para a Região Norte, junto com as observações, onde se nota o bom ajuste. Entretanto, com base na Tabela 3 pode-se observar uma diferença significativa do desempenho da equação de Fu para as duas regiões. Na Região Norte, empregando um ω igual a 2,23, as vazões de longo período estimadas são muito próximas das vazões observadas (ver Figura 4), com 50% das estações com erro relativo inferior a 10%. Já na região Sul, com um ω igual a 2,85, os resultados foram muito ruins, com apenas 25% das estações com erro relativo inferior a 15%, sendo que em algumas estações os erros ultrapassaram 100%. O caso mais notório é o da estação 36220000, localizada na cabeceira do Rio Salgado. As vazões observadas nesta estação são muito baixas, considerando sua área de drenagem. Não é possível saber neste momento se as vazões observadas estão corretas ou se as mesmas estão sendo influenciadas por algum fator externo localizado a montante, mas é algo que precisa ser verificado.

Tabela 3: Resultados do ajuste do parâmetro ω da equação de Fu para estimativas de médias de longo período para as regiões Norte e Sul.

Estação	Região	ω	$\omega_{\text{região}}$	$Q_{\text{observada}}$	Q_{modelo}	Erro relativo (%)
34730000	Norte	2,22	2,23	109,1	108,2	0,9
35125000	Norte	2,47	2,23	147,6	190,1	2,9
35170000	Norte	2,30	2,23	248,7	264,4	6,3
35210000	Norte	2,09	2,23	181,2	153,6	15,2

Estação	Região	ω	$\omega_{\text{região}}$	$Q_{\text{observada}}$	Q_{modelo}	Erro relativo (%)
35223000	Norte	2,02	2,23	234,0	183,5	21,6
35240000	Norte	2,32	2,23	65,1	74,9	15,0
35260000	Norte	2,38	2,23	105,3	126,5	20,1
35263000	Norte	2,15	2,23	248,2	230,3	7,2
36020000	Sul	2,48	2,85	37,7	21,0	44,3
36125000	Sul	3,16	2,85	39,5	57,0	44,3
36130000	Sul	2,31	2,85	151,1	84,1	44,3
36160000	Sul	2,77	2,85	37,2	33,5	9,9
36220000	Sul	5,46	2,85	5,6	74,0	1.211,5
36250000	Sul	3,71	2,85	32,6	79,0	142,3
36290000	Sul	2,96	2,85	75,3	84,7	12,7
36470000	Sul	2,28	2,85	86,5	39,7	54,1

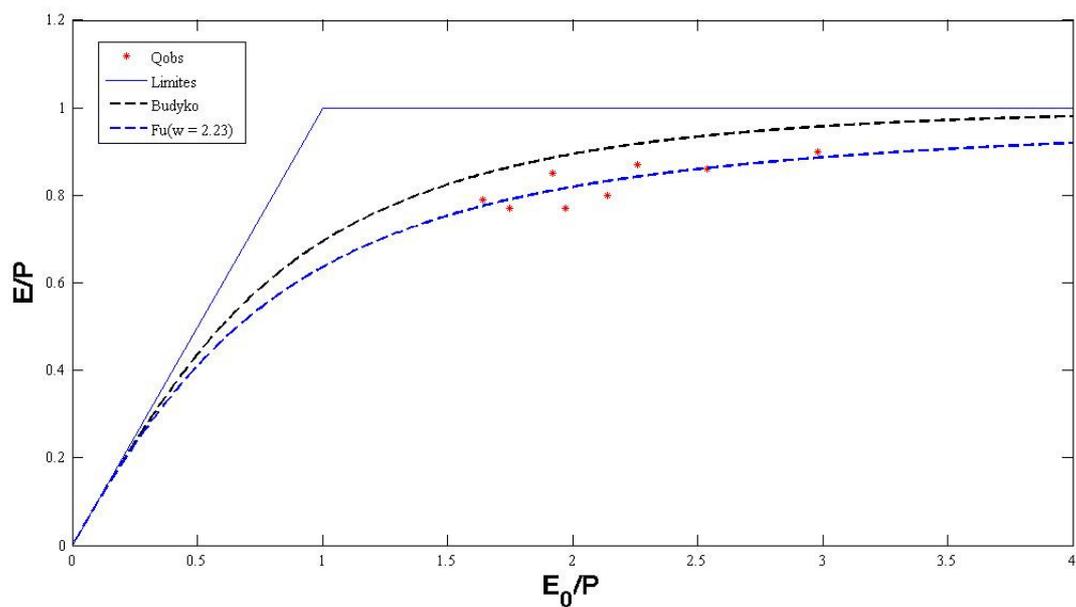


Figura 3: Ajuste da equação de Fu para o termo E/P nas bacias hidrográficas da Região Norte

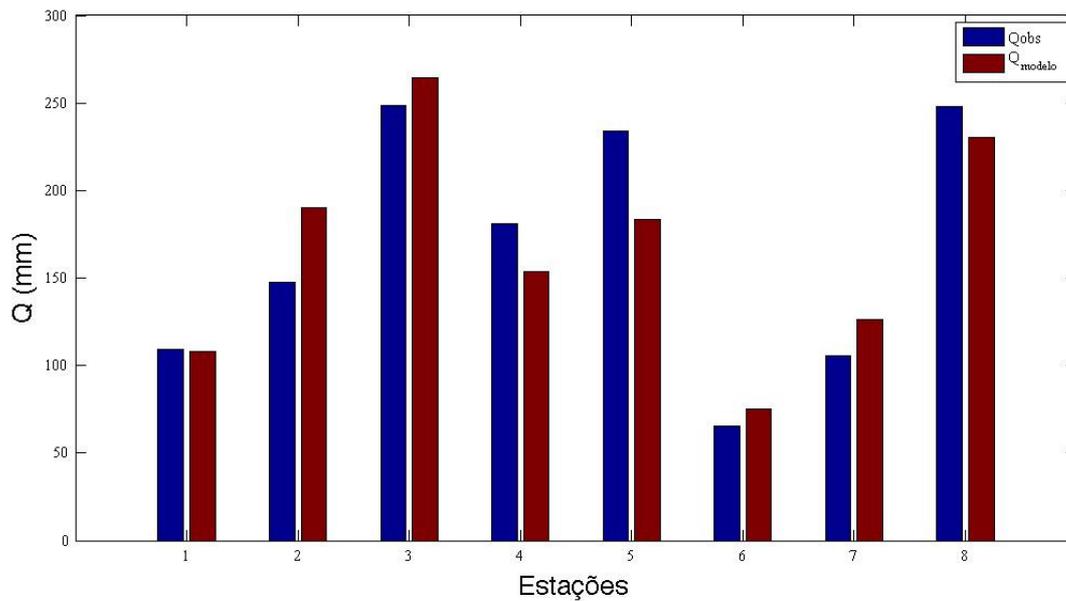


Figura 4: Comparação entre as vazões anuais de longo período observadas e calculadas com base na equação de Fu para as bacias hidrográficas da Região Norte ($\omega = 2,23$)

Uma hipótese, que pode vir a explicar o comportamento da bacia 36220000, é que a mesma situa-se numa região sedimentar, com pouca ou nenhuma área sobre o embasamento cristalino, o que a difere das demais. Em bacias localizadas em regiões sedimentares há uma tendência maior à infiltração, resultando em menores valores de vazão e, portanto, são esperados valores altos de ω . Infelizmente, a informação específica sobre o percentual da área da bacia que se encontra sobre o embasamento cristalino não está disponível no momento, mas é possível ver no mapa geológico (não apresentado aqui) que ela possui menos área nessa condição do que estações que se encontram relativamente próximas a ela, como por exemplo, as estações 36290000 e 36250000, que possuem, respectivamente, 50% e 24% de suas áreas sobre o embasamento cristalino. Bacias da Região Norte, que tiveram um valor de ω menor do que em bacias da Região Sul, possuem percentual alto de suas áreas sobre o cristalino, sendo várias delas com valores acima de 80%.

Entretanto, a bacia 36220000 não é a única com estimativas inadequadas das vazões de longo período. A hipótese mais provável, e que precisa ser avaliada na continuação do projeto, reside no fato que ω não é uniforme na Região Sul, diferentemente do que se verificou na Região Norte. É necessário que seja feita uma análise para avaliar como ω varia espacialmente. Como dito acima, é possível que ω dependa, por exemplo, do percentual da área da bacia que se encontra sobre o embasamento cristalino. Entretanto, outras variáveis podem estar relacionadas com a variação espacial de ω , como o tipo de vegetação e as características das chuvas diárias em cada bacia, algo que precisa ser avaliado na posterior continuação dos estudos.

4.2 Séries de vazões anuais

A equação de Fu também foi utilizada para estimar séries de vazões anuais nas bacias estudadas. Partiu-se da mesma divisão regional efetuada na análise de longo período, ou seja, as bacias foram divididas em Região Norte e Região Sul, empregando um valor único do parâmetro ω para cada região.

Assim como na análise de longo período, a equação de Fu obteve resultados melhores para as bacias localizadas na Região Norte do que para as bacias localizadas na Região Sul. O ajuste do parâmetro ω para as duas regiões foi feito a partir da minimização dos resíduos ao quadrado do termo E/P.

Para as bacias localizadas na Região Norte, o valor encontrado para ω foi de 2,39, com resultados bastante satisfatórios em termos de representação das vazões anuais. A Figura 5 mostra os pares de vazões anuais observadas e calculadas com a equação de Fu para todas as bacias da região e para todos os anos empregados no estudo, enquanto a Figura 6 apresenta os hidrogramas observados e calculados, separadamente para cada uma das as oito estações da região Norte, incluindo os valores de Nash-Sutcliffe (NS).

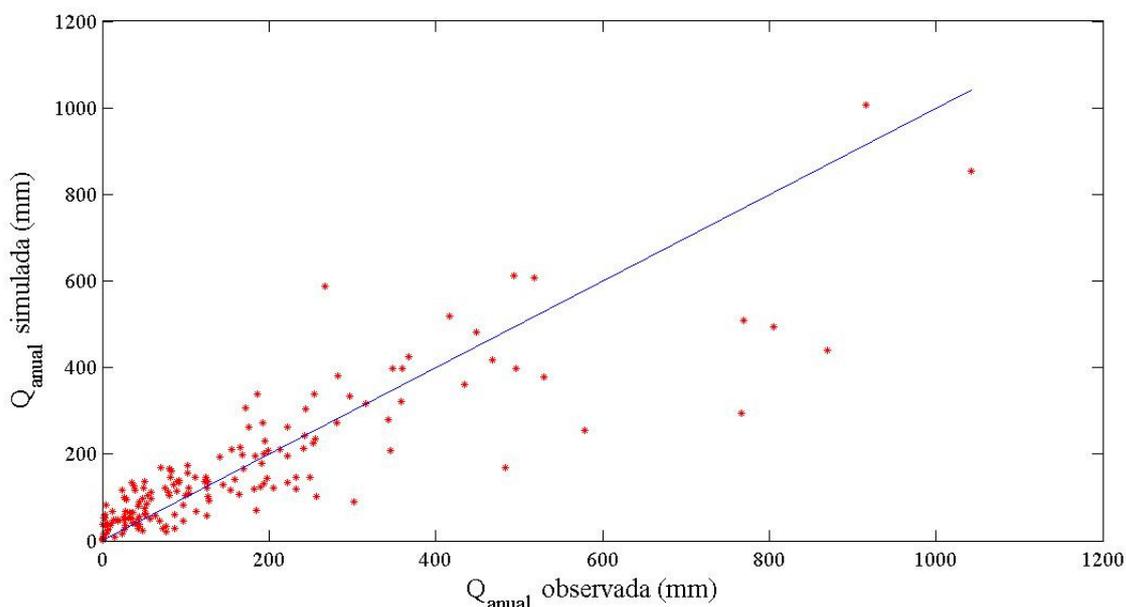


Figura 5: Comparação entre vazões anuais observadas e vazões anuais calculadas com base na equação de Fu com parâmetro ω ajustado para estações localizadas na região norte ($\omega = 2,39$).

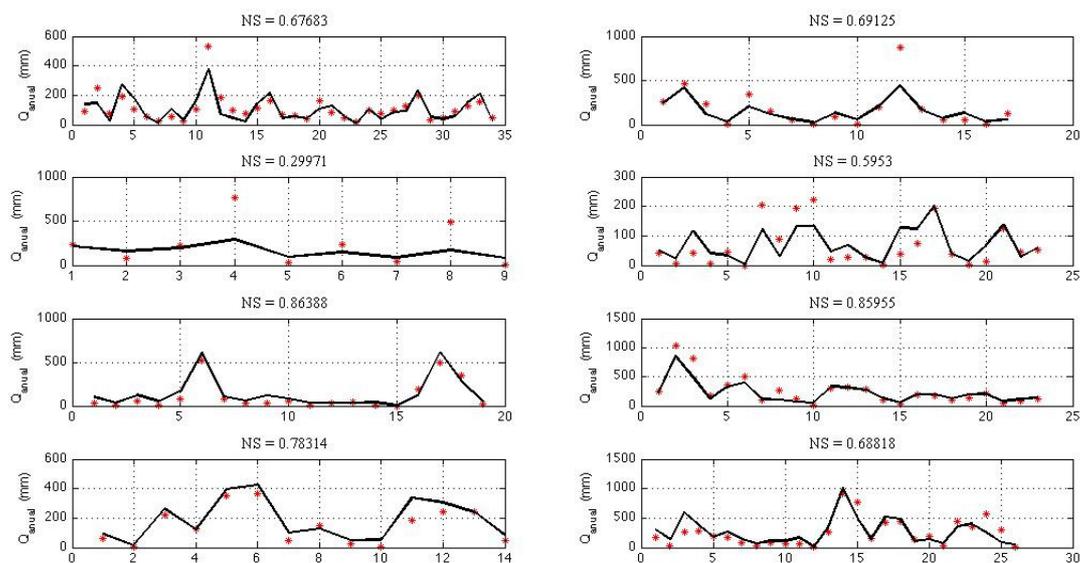


Figura 6: Comparação entre as séries de vazão anual observada (*) e simulada (linha preta) com base na equação de Fu com parâmetro ω ajustado para as oito estações da região norte ($\omega = 2,39$).

Os valores de Nash-Sutcliffe (NS) aparecem acima de cada gráfico.

Pode-se notar um ajuste satisfatório dos hidrogramas anuais, com valores de NS acima de 0,60 em sete das oito estações estudadas, sendo que em duas estações os valores foram acima de 0,85. Vale notar que estes resultados foram obtidos empregando um valor único de ω para todas as estações da região. Um passo importante a ser dado no estudo é tentar entender melhor como ω varia espacialmente, tentando identificar se e como ω depende de variáveis fisiográficas e climáticas das bacias. Se um modelo espacial para o parâmetro ω for identificado, as estimativas das séries anuais de vazão deverão melhorar ainda mais.

Os resultados obtidos para as bacias da Região Sul são apresentados nas Figuras 4 e 5. Como no caso das estimativas de longo período, os resultados não são tão animadores. O valor ajustado do parâmetro ω para a região foi igual a 2,91. Pode-se notar pelos hidrogramas apresentados na Figura 8 que o desempenho da equação de Fu na Região Sul foi inferior ao observado na Região Norte, embora alguns hidrogramas tenham sido adequadamente representados. Mais uma vez, os resultados obtidos para a estação 36220000 foram muito diferentes dos observados. Nota-se que o emprego de um valor único de ω para toda a região mostra-se claramente inadequado para estimar séries de vazões anuais em bacias localizadas na Região Sul. As hipóteses levantadas na seção 4.1 acerca dos fatores que influenciam o parâmetro ω , assim como a necessidade de entender melhor como ω varia espacialmente na região, valem também para analisar os resultados de vazões anuais para a Região Sul, algo que será explorado na continuidade do projeto.

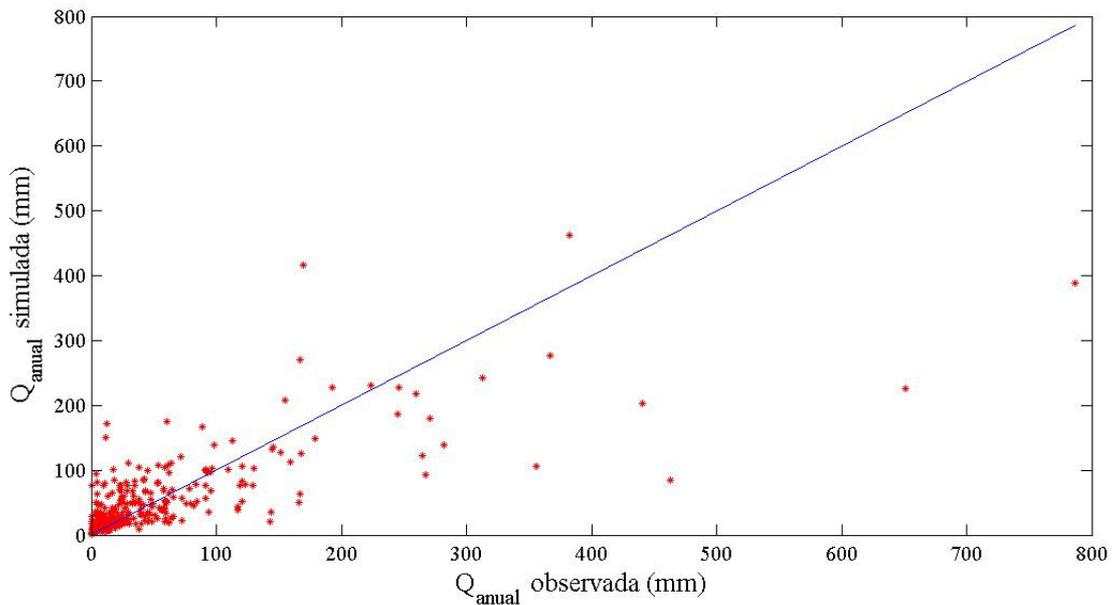


Figura 7: Comparação entre vazões anuais observadas e vazões anuais calculadas com base na equação de Fu com parâmetro ω ajustado para estações localizadas na região sul ($\omega = 2,91$).

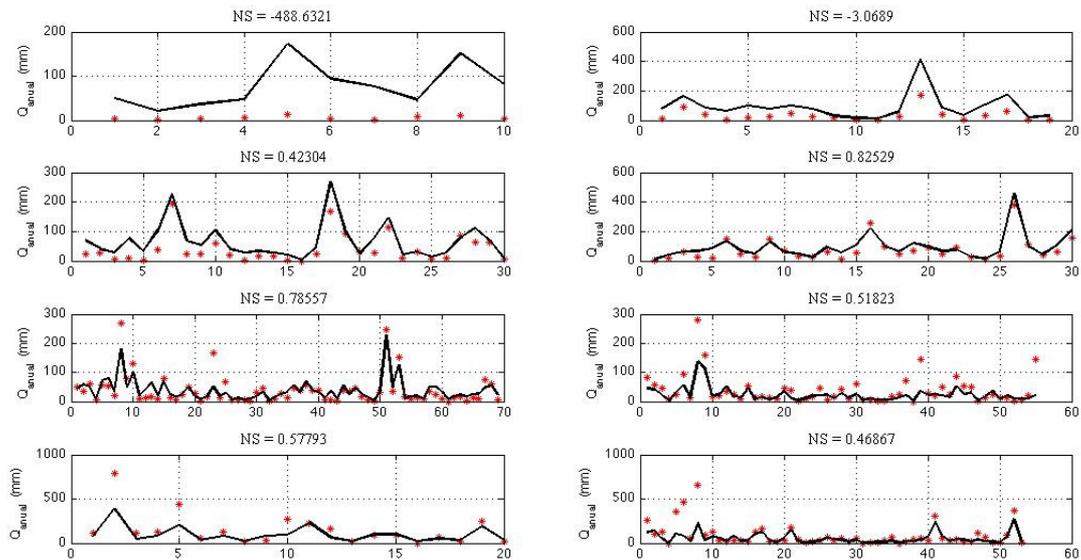


Figura 8: Comparação entre as séries de vazão anual observada (*) e simulada (linha preta) com base na equação de Fu com parâmetro ω ajustado para as sete estações da região sul ($\omega = 2,91$). Os valores de Nash-Sutcliffe (NS) aparecem acima de cada gráfico. Estação 36220000 é apresentada no canto superior esquerdo.

5- CONCLUSÕES

Este artigo apresenta os resultados de um estudo em andamento, que procura avaliar o desempenho de equações analíticas, baseadas nas hipóteses de Budyko, para estimar séries anuais de vazões em bacias não monitoradas. Fazer uma avaliação criteriosa do desempenho dessas equações é importante, pois estimativas de séries anuais de vazão utilizando apenas valores de precipitação e evapotranspiração potencial podem contribuir para a redução das incertezas nas estimativas regionais de parâmetros de modelos hidrológicos conceituais para serem aplicados em locais sem dados de vazão.

O estudo focou na equação analítica de Fu, que possui apenas um parâmetro, denominado ω , tendo sido aplicada em 16 bacias hidrográficas do estado do Ceará. Duas análises foram realizadas, uma para a estimativa da vazão média de longo período, e outra para a estimativa de séries de vazões anuais.

Observou-se que o uso de um valor único do parâmetro ω para todo o estado resultou em estimativas inadequadas para as bacias estudadas. Quando ajustados individualmente para cada bacia, percebeu-se que o valor de ω variava consideravelmente nas bacias do Alto Jaguaribe e do rio Salgado, ambas localizadas no sul do estado, enquanto que no restante das bacias, os valores eram mais homogêneos. Embora não tenha sido realizada neste estudo, esse tipo de resultado mostra a necessidade de se tentar estabelecer um modelo regional para o parâmetro ω , que segundo a literatura, pode estar relacionado, por exemplo, com uma relação entre a intensidade das chuvas na região e a capacidade de armazenamento do solo, tipo de vegetação, a características da chuva diária, como o coeficiente de variação.

O estado foi dividido então em duas regiões, denominadas aqui de Norte e Sul, sendo a região Sul a que inclui as bacias do Alto Jaguaribe e do Salgado. Decidiu-se avaliar o desempenho da equação de Fu empregando um valor único de ω para cada região. No estudo de estimativa de vazões médias de longo período, os resultados foram bastante promissores para a região Norte, com erros relativos menores do que 10% em 50% das bacias, e com erro relativo máximo de 22%. Os resultados para a região Sul foram inadequados, na grande maioria dos casos, indicando a necessidade de se compreender como e porque o parâmetro ω varia na região, algo que será estudado ao longo da execução do estudo.

Os resultados da estimativa das séries de vazões anuais também foram adequados para a região Norte. Das oito bacias estudadas, em sete os resultados de Nash-Sutcliffe foram maiores do que 0,60, sendo que em duas bacias, NS foi maior do que 0,85, mostrando o valor potencial desta

metodologia, cujos resultados podem vir a se aplicados em estudos de regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos, quando aplicados em bacias sem monitoramento de vazão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INMET pelos dados das estações climatológicas localizadas no estado do Ceará, à FUNCEME pelos dados de chuva e pelas informações sobre as características das bacias hidrográficas utilizadas neste estudo, e ao Ms. Venícius Barros, da FUNCEME, pelas informações organizadas sobre as séries mensais de vazão dos postos fluviométricos utilizados, incluindo uma análise dos períodos sob influência de reservatórios.

BIBLIOGRAFIA

ARORA, V.K. (2002). “*The Use of the Aridity Index to Assess Climate Change Effect on Annual Runoff.*” *Journal of Hydrology* 265 (1): 164–177.

BAKER, DE, AND CR AHERN. (1989). “*Estimates of Effective Rooting Depth for Predicting Available Water Capacity of Burdekin Soils, Queensland.*” *Soil Research* 27 (2): 439–454.

BARROS, F.V. (2012). “*Estudo de Calibração dos Postos Fluviométricos do Estado do Ceará.* Relatório Técnico. FUNCEME e COGERH.

BUDYKO, M.I. (1974). *Climate and Life*. Academic Press, Nova Iorque.

CHENG, L.; ZONGXUE, X.; DINGBAO, W.; XIMING, C.(2011). “*Assessing Interannual Variability of Evapotranspiration at the Catchment Scale Using Satellite-Based Evapotranspiration Data Sets.*” *Water Resources Research* 47 (9) (September 10): 1–11.

CHOUDHURY, B.J. (1999). “*Evaluation of an Empirical Equation for Annual Evaporation Using Field Observations and Results From a Biophysical Model.*” *Journal of Hydrology* 216 (1-2): 99–110.

DONOHUE, R. J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T. R. (2010). “*Can Dynamic Vegetation Information Improve the Accuracy of Budyko’s Hydrological Model?.*” *Journal of Hydrology* 390 (1-2) (August 20): 23–34.

DONOHUE, R; J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T.R. (2012). “*Roots, Storms and Soil Pores: Incorporating Key Ecohydrological Processes Into Budyko’s Hydrological Model.*” *Journal of Hydrology* 436-437 (C) (May 2): 35–50..

- DOOGE, J.C.I.; BRUEN, M.; PARMENTIER, B. (1999). "A Simple Model for Estimating the Sensitivity of Runoff to Long-Term Changes in Precipitation Without a Change in Vegetation." *Advances in Water Resources* 23 (2): 153–163.
- FU; GUOBIN; CHARLES, S.P.; CHIEW, F.H.S. (2007). "A Two-Parameter Climate Elasticity of Streamflow Index to Assess Climate Change Effects on Annual Streamflow." *Water Resources Research* 43 (11) (November 24): 1–12.
- FU; GUOBIN; STEPHEN, P. C.; JINGJIE, Y.; CHANGMING, L. (2009). "Decadal Climatic Variability, Trends, and Future Scenarios for the North China Plain." *Journal of Climate* 22 (8) (April): 2111–2123.
- GERRITS, A. M. J.; SAVENIJE, H. H. G.; VELING, E. J. M.; PFISTER, L. (2009). "Analytical Derivation of the Budyko Curve Based on Rainfall Characteristics and a Simple Evaporation Model." *Water Resources Research*.
- MILLY, P. C. D. (2002). "Macroscale Water Fluxes 2. Water and Energy Supply Control of Their Interannual Variability." *Water Resources Research* 38 (10).
- NĚMEC, J.; SCHAAKE, J. (1982). "Sensitivity of Water Resource Systems to Climate Variation/Sensibilité Des Systèmes De Ressources en Eau Aux Variations Climatiques." *Hydrological Sciences Journal*. 27 (3): 327–343.
- NIEMANN, J. D. (2005). "Sensitivity of Regional Hydrology to Climate Changes, with Application to the Illinois River Basin." *Water Resources Research* 41 (7): 1–15.
- OL'DEKOP, E. M. (1911). On Evaporation from the Surface of River Basins. Tr. Meteorol. Univ. Tartu, 4.
- PALMROTH; SARI; KATUL, G. G.; DAFENG, H.; MCCARTHY, H. R.; JACKSON, R. B.; OREN, R. (2010). "Estimation of Long-Term Basin Scale Evapotranspiration From Streamflow Time Series." *Water Resources Research* 46.
- POTTER, N. J.; ZHANG, L. (2009). "Interannual Variability of Catchment Water Balance in Australia." *Journal of Hydrology* 369 (1-2) (May 5): 120–129.
- RENNER, M.; SEPPELT, R.; BERNHOFER, C. (2011). "A Simple Water-Energy Balance Framework to Predict the Sensitivity of Streamflow to Climate Change." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8 (5): 8793–8830.
- RODERICK, M.L.; FARQUHAR, G.D. (2011). "A Simple Framework for Relating Variations in Runoff to Variations in Climatic Conditions and Catchment Properties." *Water Resources Research* 47 (June 21).
- SANKARASUBRAMANIAN, A.; VOGEL, R. M.; LIMBRUNNER, J. F. (2001). "Climate Elasticity of Streamflow in the United States." *Water Resources Research* 37 (6): 1771–1781.

- SCHREIBER, P. (1904). "Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa." *Z. Meteorol.* 21, Pt. 10.
- SZILAGYI; JOZSEF; JOZSA, J. (2009). "Complementary Relationship of Evaporation and the Mean Annual Water-Energy Balance." *Water Resources Research* 45.
- WANG, S.; ZHANG, Z.; SUN, G.; MCNULTY, S.G.; ZHANG, H.; LI, J.; ZHANG, M. (2008). "Long Term Streamflow Response to Climatic Variability in the Loess Plateau, China." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 44 (5): 1098–1107.
- YANG; DAWEN; FUBAO, S.; ZHIYU, L.; ZHENTAO, C.; ZHIDONG, L.(2006). "Interpreting the Complementary Relationship in Non-Humid Environments Based on the Budyko and Penman Hypotheses." *Geophysical Research Letters* 33 (18): 1–5.
- YANG; DAWEN; FUBAO, S.; ZHIYU, L.; ZHENTAO, C.; GUANGHENG, N.; ZHIDONG, L. (2007). "Analyzing Spatial and Temporal Variability of Annual Water-Energy Balance in Nonhumid Regions of China Using the Budyko Hypothesis." *Water Resources Research* 43 (4) (April 25): 1–12.
- YANG; HANBO; YANG, D. (2011). "Derivation of Climate Elasticity of Runoff to Assess the Effects of Climate Change on Annual Runoff." *Water Resources Research* 47 (7) (July 14): 1–12.
- YANG; HANBO; D. YANG, ZHIDONG, L.; FUBAO, S. (2008). "New Analytical Derivation of the Mean Annual Water-Energy Balance Equation." *Water Resources Research* 44 (3) (March 12): 1–9.
- ZHAN; CHE-SHENG; JUN, X.; CHEN, Z. ; QI-TING, Z. (2008). "An Integrated Hydrological and Meteorological Approach for the Simulation of Terrestrial Evapotranspiration." *Hydrological Sciences Journal*. 53 (6) (November 7): 1151–1164.
- ZHANG, L.; HICKEL, K.; DAWES, W.R.; CHIEW, F.H.S.; WESTERN, A.W.; BRIGGS, P.R. (2004). "A Rational Function Approach for Estimating Mean Annual Evapotranspiration." *Water Resources Research* 40 (2): W02502.
- ZHANG, L.; POTTER, N.; HICKEL, K.; ZHANG, Y.; SHAO, Q. (2008). "Water Balance Modeling Over Variable Time Scales Based on the Budyko Framework—Model Development and Testing." *Journal of Hydrology* 360: 117–131.