

# Modelo de regionalização de hidrogramas unitários para bacias hidrográficas do Ceará

*Regionalization model for unit hydrograph for watersheds in Ceará*

• **Data de entrada:**  
26/12/2019

• **Data de aprovação:**  
02/07/2020

Jefferson Sousa Rocha<sup>1\*</sup> | Brenda Lara Duarte Souza Carneiro<sup>2</sup> | Vanda Tereza Costa Malveira<sup>3</sup> | Iran Eduardo Lima Neto<sup>2</sup> |

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.079>

## ORCID ID

Rocha JS  <https://orcid.org/0000-0002-4079-033X>

Carneiro BLDS  <https://orcid.org/0000-0002-9463-7058>

Malveira VTC  <https://orcid.org/0000-0002-7002-1240>

Lima Neto IEL  <https://orcid.org/0000-0001-8612-5848>

## Resumo

Entender as características hidrológicas de uma região é essencial para compreender seus problemas e, assim, propor soluções quanto à gestão dos recursos hídricos. Por isso, o presente trabalho elaborou um modelo de regionalização para a obtenção de hidrogramas unitários triangulares de bacias hidrográficas localizadas em barragens do semiárido cearense. As variáveis empregadas nas equações de regressão não linear foram: área de drenagem da bacia hidrográfica, comprimento do rio principal e tempo de concentração. Foram utilizados dados de projeto das barragens e pesquisas de caráter bibliográfico com significativas contribuições para os estudos hidrológicos. Nos resultados obtidos verificou-se boa aproximação entre as equações de regressão não linear e o método do hidrograma unitário sintético triangular, fato comprovado pelos testes estatísticos para cada caso. Concluiu-se que a regionalização definida para essas bacias pode ser considerada consistente e de fácil aplicação para análises preliminares em projetos hidráulicos similares.

**Palavras-chave:** Regionalização. Regressão. Hidrograma. Semiárido.

## Abstract

*Understanding the hydrological characteristics of a region is essential to understanding its problems and, therefore, proposing solutions regarding water resources management. Therefore, the present study elaborated a regionalization model to obtain triangular unitary hydrographs from watershed located in dams of Ceará semiarid region, Brazil. The variables used in the non-linear regression equations were: drainage area of the watershed, main river length and time of concentration. Dam design data and bibliographic research with significant contributions to hydrological studies were used. In the obtained results it was verified good approximation between the non-linear regression equations and the triangular synthetic unit hydrograph method, fact confirmed by the statistical tests for each case. The conclusion is that the regionalization defined for these basins can be considered consistent and easy to apply for preliminary analysis in similar hydraulic projects.*

**Keywords:** Regionalization. Regression. Hydrograph. Semiarid.

<sup>1</sup> Faculdade Luciano Feijão - Sobral - Ceará - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará - Fortaleza - Ceará - Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Estadual Vale do Acaraú - Sobral - Ceará - Brasil.

\* **Autor correspondente:** jeffersonsrocha@outlook.com.

## 1 INTRODUÇÃO

O escoamento superficial pode ser considerado uma das fases mais importantes dentro do ciclo hidrológico para a engenharia. Por isso, os estudos hidrológicos se concentram basicamente em como aproveitar esse recurso e como se proteger contra seu potencial de destruição. De acordo com Pádua (2015), esses estudos utilizam os princípios da hidrologia para projetar, planejar e operar estruturas físicas que lidam diretamente com os recursos hídricos, como é o caso das barragens.

Devido à importância das barragens para a região do semiárido brasileiro, pela falta de observações pluviométricas e pelos riscos inerentes dessas estruturas, é fundamental que haja uma busca contínua no aperfeiçoamento de métodos que possam prever, com o mínimo de erro possível, as cheias nas bacias (PAGANO et al., 2014).

A simples aplicação dos métodos tradicionais de obtenção de hidrogramas pode gerar problemas relacionados à falta de parâmetros importantes que contribuem significativamente para as cheias nas bacias. Além disso, a maioria desses métodos foi desenvolvida para bacias de outros países, dificultando, assim, a aplicabilidade para bacias com as características brasileiras (TUCCI, 2003).

Os métodos para estimar a ocorrência de fenômenos extremos na hidrologia necessitam de dados pluviométricos e fluviométricos. Porém, sem a devida manutenção nos poucos equipamentos existentes e até mesmo devido à falta deles, a obtenção dos dados de monitoramento das bacias brasileiras se torna um processo bastante exigente para o engenheiro (PORTO, 1977). Além dessa precariedade no monitoramento, mesmo existindo dados referentes às bacias, é necessário que essas amostras tenham um tamanho suficiente para a análise, requerendo um tempo de monitoramento adequado. Para tentar estimar

esses valores extremos e tornar os projetos viáveis com o mínimo de erro possível, os hidrólogos recorreram à regionalização.

A regionalização tem como característica principal a transferência de informações de locais monitorados para bacias com pouco ou nenhum monitoramento (PÁDUA, 2015). Entretanto, segundo Tucci (2003), os métodos de regionalização apenas tentam minimizar a falta de informações para melhor ajustar os modelos hidrológicos, ou seja, não são utilizados para substituir valores existentes. Há vários métodos de regionalização hidrológica, como os descritos por Dalrymple (1960), ELETROBRÁS (1985), Baena et al. (2004), Laaha e Blöschl (2006), Isik e Singh (2008), Sarhadi e Modarres (2011) e Wolff (2017).

Segundo Tucci (2009), os modelos que tentam representar o escoamento apresentam algumas limitações decorrentes de variações do relevo, disponibilidade de informações e características numéricas de solução das equações. Dentre os principais modelos, o hidrograma unitário é um dos mais utilizados (SILVA, PALÁCIO JÚNIOR e CAMPOS, 2014). Conforme Campos, Rabelo e Lima Neto (2019), Sherman, em 1932, foi o primeiro a apresentar o hidrograma unitário ou método HU, que passaria por vários aperfeiçoamentos ao longo dos anos. O HU, de acordo com Naghettini (2012), é um hidrograma para uma precipitação efetiva constante, de certa duração, distribuída uniformemente sobre toda a área da bacia e com altura de precipitação igual a uma unidade pluviométrica.

Para regiões onde os dados históricos são insuficientes ou inexistentes, o hidrograma é estimado pelo hidrograma unitário sintético ou HUS. Esse modelo se baseia em parâmetros empíricos para estimar valores de vazões e de alguns tempos característicos, como o tempo de pico e o tempo de base. A simplicidade, a facilidade e a necessidade

de menos dados caracterizam o hidrograma unitário sintético (BHUNYA, PANDA e GOEL, 2011).

O Hidrograma Unitário Sintético Triangular (HUST) foi proposto pelo Departamento de Conservação do Solo (Soil Conservation Service) dos EUA (SCS, 1972). De acordo com Campos, Rabelo e Lima Neto (2019), esse modelo consiste em um gráfico de vazão pelo tempo com uma chuva efetiva unitária de determinada duração. Esse gráfico é chamado de hidrograma e possui um formato triangular devido às relações propostas pelo método entre os parâmetros necessários.

Alguns estudos envolvendo a regionalização em regiões semiáridas são discutidos a seguir. Zaman, Rahman e Haddad (2011) utilizaram as técnicas de regressão com a distribuição de Pareto para encontrar equações de vazões médias anuais de séries de duração parcial de alguns estados da Austrália. Entretanto, os autores usaram apenas duas variáveis independentes: a intensidade de precipitação e a área da bacia hidrográfica, enquanto neste trabalho foram levadas em consideração outras características importantes da bacia, como o comprimento do rio principal e o tempo de concentração. Já Liu, Xie e Zeng (2016) propuseram regionalizar por regressão a vazão de pico da seção do rio Heihe, inserido na região semiárida da China. Os ótimos resultados foram comprovados utilizando outras quatro regiões não monitoradas, apesar de aplicarem apenas um estudo de caso. Porém, é necessário empregar mais estudos de casos para uma melhor regionalização de áreas semiáridas, assim como foi realizado neste trabalho. Virões e Cirilo (2019) desenvolveram uma regionalização

de vazão envolvendo quatro estados do Brasil. Os autores utilizaram o método MODHAC (Modelo Hidrológico Autocalibrável) em algumas estações fluviométricas. Embora tenham encontrado índices satisfatórios na regionalização, os autores destacaram a dificuldade encontrada com a qualidade dos dados das estações, enquanto neste trabalho os dados não estavam suscetíveis a esses erros, pois foram usados somente dados de projetos reais.

Como forma de contribuir para os estudos de regionalização e análise de bacias hidrográficas com pouco monitoramento, propõe-se neste trabalho a regionalização do Hidrograma Unitário Sintético Triangular (HUST) em bacias onde estão inseridas algumas barragens cearenses. Propõe-se elaborar um método de regressão consistente para a determinação de vazões de pico para projetos de estruturas hidráulicas. As principais diferenças deste trabalho em relação aos estudos de Zaman, Rahman e Haddad (2011), Liu, Xie e Zeng (2016) e Virões e Cirilo (2019) são: a incorporação de várias características da bacia no cálculo das vazões; a aplicação do método do hidrograma para um número significativo de amostras e a utilização de dados reais de projetos.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho foi dividida em três partes: i) Obtenção dos dados, ii) Cálculo dos HUST's de acordo com o método SCS e iii) Regionalização dos HUST's utilizando a regressão múltipla não linear. A Fig. 1 ilustra a metodologia utilizada.

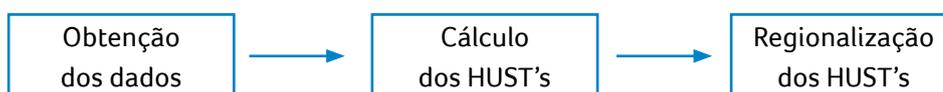


Figura 1 - Metodologia utilizada neste trabalho.

## 2.1 Área de estudo

A seguir estão listadas as barragens analisadas, suas respectivas cidades, rios barrados, bacias

hidrográficas e a ferramenta utilizada na aplicação do método SCS.

**Tabela 1** - Localização e bacias hidrográficas das barragens analisadas.

Barragem	Município	Rio/Riacho	Bacia	Ferramenta
Aracoiaba	Aracoiaba	Aracoiaba	Metropolitana	Direto
Benguê	Aiuaba	Umbuzeiro	Alto Jaguaribe	Direto
Figueiredo	Iracema	Figueiredo	Médio Jaguaribe	HEC-HMS
Gameleira	Itapipoca	Mundaú	Litoral	HEC-HMS
Gangorra	Granja	Gangorra	Coreaú	HEC-HMS
Germinal	Palmácia	Pacoti	Metropolitana	HEC-HMS
Jaburu I	Ubajara	Jaburu	Serra da Ibiapaba	HEC-HMS
Jatobá	Ipueiras	Jatobá	Acaraú	HEC-HMS
Jenipapeiro	Baixio	Jenipapeiro	Salgado	HEC-HMS
Malcozinhado	Cascavel	Mal Cozinhado	Metropolitana	HEC-HMS
Mamoeiro	Antonina do Norte	Conceição	Alto Jaguaribe	HEC-HMS
Missi	Miraíma	Missi	Litoral	HEC-HMS
Olho D'água	Várzea Alegre	Machado	Salgado	Direto
Parambu	Parambu	Puiú	Alto Jaguaribe	Direto
Poço da Pedra	Campos Sales	Conceição	Alto Jaguaribe	HEC-HMS
Rosário	Lavras da Mangabeira	Rosário	Salgado	HEC-HMS
Taquara	Cariré	Jaibaras	Acaraú	HEC-HMS
Ubalzinho	Cedro	São Miguel	Salgado	HEC-HMS
Umari	Madalena	Barrigas	Banabuiú	HEC-HMS

As informações aqui apresentadas foram extraídas dos estudos executivos dos projetos das barragens e do Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará. O acesso deu-se por meio da Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (SRH).

A maioria das barragens analisadas pertence a municípios que estão inseridos no clima semiárido. Esse clima é caracterizado pela baixa umidade e por baixos índices pluviométricos (CAMPOS et al., 2016; RABELO e LIMA NETO, 2018). Tamaña aridez permite entender a preocupação existente com a água e com as estruturas hídricas do Estado.

Segundo a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (2018), existem 12 bacias hidrográficas gerenciadas pelo Estado, das quais 9 foram abordadas neste trabalho, exceto as bacias do Curu, Baixo Jaguaribe e Sertões de Crateús. Isso acarreta numa análise mais variada e abrangente de estudo, fazendo com que a regionalização consiga englobar características importantes do semiárido cearense. Além disso, na Fig. 2, está representado o mapa cearense com as barragens que compõem este estudo.



Figura 2 - Localização das barragens analisadas no mapa do Ceará.

### 2.2 Obtenção dos HUST's

Para a obtenção dos hidrogramas unitários, foi utilizado o método do SCS. Esse método consiste em encontrar a vazão máxima e os tempos do hidrograma por meio apenas do tempo de concentração e da área da bacia de drenagem.

Na Tabela 1 são apresentadas as ferramentas utilizadas para obtenção do método SCS nos projetos executivos analisados. Na maioria desses projetos foi utilizado o software HEC-HMS; os demais empregaram diretamente as fórmulas do método SCS. Além disso, a maior parte desses projetos utilizou a fórmula de Kirpich para o cálculo dos tempos de concentração, com exceção apenas das barragens Figueiredo e Taquara, que utilizaram a fórmula de Dodge.

### 2.3 Regionalização dos HUST's

Nessa etapa, o modelo utilizado para a obtenção dos HUST's foi estudado para a obtenção de modelos regionais que tentassem descrever o comportamento da bacia hidrográfica diante de um evento chuvoso, por meio de um hidrograma de cheia, em função das suas características físicas e hidrológicas.

Como o número de barragens analisadas é relativamente baixo, optou-se por organizá-las em um único grupo. Além disso, o principal critério utilizado para tentar homogeneizar a amostra foi a proximidade espacial, levando em consideração que a maioria delas pertence ao semiárido cearense.

Para a regionalização do HUST foi utilizada a Regressão Múltipla Não Linear. Para tal, foram realizados estudos de correlação entre as variáveis das bacias em função dos parâmetros de entrada do método utilizado. As variáveis independentes utilizadas foram: área da bacia hidrográfica (A), comprimento do talvegue principal (L) e tempo de concentração (Tc). Já as variáveis dependentes foram: vazão de pico (Q<sub>máx</sub>), tempo de base (tb) e tempo de pico (tp0). As equações não consideraram outras características físicas importantes das bacias, como a declividade e a área da bacia hidráulica. No caso da declividade, não foi possível inseri-la devido à falta de dados para as barragens analisadas. Já para a área hidráulica,

os dados foram obtidos e calculados as equações de regressão, porém os resultados envolvendo essa variável ou não passaram nos testes estatísticos ou não obtiveram grande significância se comparados com as outras variáveis.

Foram analisadas as variáveis que melhor se correlacionassem com as características escolhidas. Essas análises foram feitas por meio do coeficiente de determinação, variância da variável explicada e o erro padrão de estimativa.

Todos os cálculos e análises foram realizados por meio de planilha eletrônica. Os parâmetros dependentes e independentes dos HUST obtidos dos projetos são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Parâmetros das barragens analisadas.

Barragem	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>po</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)	A (km <sup>2</sup> )	T <sub>c</sub> (h)	L (km)
Aracoiaba	21,87	5,60	14,95	588,60	8,00	53,10
Benguê	21,05	10,50	28,03	1062,30	15,00	73,00
Figueiredo	13,38	25,20	67,28	1621,00	36,00	88,30
Gameleira	12,84	8,42	22,48	519,77	1,10	59,00
Gangorra	5,23	4,16	11,12	104,70	5,95	18,00
Germinal	9,31	2,10	5,61	94,00	3,00	23,00
Jaburu I	13,17	4,96	12,30	314,10	7,09	36,37
Jatobá	11,18	0,77	2,06	41,38	2,93	9,60
Jenipapeiro	13,68	2,84	7,57	186,40	4,05	27,80
Malcozinhado	5,36	9,31	24,86	240,00	13,30	22,50
Mamoeiro	26,68	14,72	39,30	1887,60	12,03	107,63
Missi	30,31	4,48	11,96	652,60	6,40	57,57
Olho D'água	5,20	2,87	7,66	71,80	4,10	21,50
Parambu	8,83	2,45	6,54	104,00	3,50	16,80
Poço da Pedra	25,06	6,64	17,72	800,00	21,03	44,90
Rosário	9,98	6,86	18,32	329,00	9,80	52,30
Taquara	12,01	9,80	26,17	565,73	14,00	42,75
Ubalzinho	9,34	3,92	10,47	176,00	5,60	27,00
Umari	27,60	7,35	19,62	975,00	10,50	65,50

A primeira etapa consiste em determinar as correlações entre as variáveis independentes e dependentes. A avaliação foi feita pelo coeficiente

de correlação linear, cujos valores variam entre 1 e -1. Esse coeficiente mede a dependência linear entre as variáveis.

Destaca-se a utilização da técnica de linearização logarítmica para transformar as equações não lineares em lineares, de modo a tornar mais fáceis os cálculos dos coeficientes de regressão e os testes estatísticos. (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Após a elaboração da tabela de correlação, selecionaram-se duas variáveis com maiores coeficientes em relação à variável dependente utilizada. As variáveis independentes que apresentaram coeficiente de correlação maior que 0,85 entre si foram analisadas e, conforme recomendação de Naghettini e Pinto (2007), uma das duas variáveis era eliminada, já que variáveis colineares não fornecem novas informações à equação.

Duas importantes técnicas utilizadas para avaliar as equações obtidas foram o F total e F parcial. A análise do F total permite avaliar a capacidade do conjunto de variáveis independentes em explicar a variável dependente. O valor encontrado deve ser comparado com o teste de hipótese, modelado pela distribuição Snedecor. Se o valor do F total for maior que o valor encontrado para a distribuição de Snedecor, então a variável independente contribui de modo significativo para a regressão. Já o F parcial avalia a contribuição de uma única variável independente em explicar a variável dependente. O valor encontrado também deve ser maior do que o modelado pela distribuição Snedecor.

Por fim, a última análise realizada consiste na comparação do erro padrão da equação encontrada (Se) com o desvio padrão amostral da variável dependente (SY). O erro padrão deve ser menor do que o desvio padrão da variável dependente para que a equação de regressão seja considerada de bom ajuste.

Na Tabela 3 estão listados os testes estatísticos utilizados para a avaliação das equações de regressão com suas respectivas fórmulas.

**Tabela 3** - Conjunto de equações utilizadas para verificar a regionalização.

Símbolo	Fórmula
r	$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$
r <sup>2</sup>	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$
F <sub>total</sub>	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}{\sum (y_i - \hat{y})^2 / (n - P - 1)}$
F <sub>parcial</sub>	$\frac{SQ\ Reg\ (X_p)}{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}$
S <sub>e</sub>	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n - P - 1}}$
S <sub>y</sub>	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$

Onde:

$x_i$  e  $y_i$  são as observações das variáveis X e Y, respectivamente;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias de cada variável X e Y, respectivamente;

$\hat{y}$  é a estimativa encontrada para a variável Y;

P é o número de variáveis independentes da equação;

n é o tamanho da amostra;

$X_p$  é uma das variáveis independentes;

SQ Reg ( $X_p$ ) é a diferença entre o somatório quadrático da regressão com  $X_p$  e o somatório quadrático da regressão sem  $X_p$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo a metodologia, foram obtidos os gráficos dos HUST, de acordo com o método do SCS. Após a construção dos hidrogramas pelo método do SCS, deu-se início à regionalização desses hidrogramas pelos métodos de regressão.

Antes de iniciar os cálculos das equações de regressão, foi necessário encontrar os valores da distribuição F de Snedecor para o nível de significância de  $\alpha = 0,05$ . Para equações envolvendo uma e duas variáveis independentes, os valores encontrados foram, respectivamente, 4,45 e 3,63. Já os valores para as equações envolvendo três e quatro variáveis independentes foram, respectivamente, 3,29 e 3,11. Esses valores foram obtidos pela distribuição F de Snedecor. Além disso, o desvio padrão das variáveis  $t_b$ ,  $t_{p0}$  e  $Q_{m\acute{a}x}$  foi, respectivamente, 0,789, 0,789 e 0,561.

A primeira variável dependente escolhida para iniciar os cálculos foi o tempo de base ( $t_b$ ) do hidrograma. Inicialmente foi elaborada a matriz de correlação entre as variáveis desejadas buscando encontrar as melhores variáveis independentes que se correlacionassem com a variável dependente (Tabela 4).

**Tabela 4** - Matriz de correlações para o tempo de base ( $t_b$ ).

Matriz de Correlações				
Variável	$t_b$ (h)	$T_c$ (h)	A (km <sup>2</sup> )	L (km)
$t_b$ (h)	1			
$T_c$ (h)	0,858	1		
A (km <sup>2</sup> )	0,835	0,692	1	
L (km)	0,778	0,560	0,953	1

Conforme a Tabela 5, os resultados obtidos mostraram uma maior correlação linear entre as variáveis independentes  $T_c$ , A e a variável dependente  $t_b$ . Além disso, percebeu-se uma colinearidade entre A e L. O coeficiente de correlação entre ambas foi de 0,953, por isso todas as equações

envolvendo as variáveis A e L ao mesmo tempo foram descartadas.

Na sequência, foram inseridas uma a uma as demais variáveis independentes. A cada inserção, era calculado o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), F total, F parcial e o erro padrão. Na Tabela 6, são apresentados somente os resultados que passaram nos testes de verificação.

**Tabela 5** - Equações para a variável dependente  $t_b$ .

Equação	$r^2$	F Total	F parcial	$S_e$
$t_b = 3,93 \cdot T_c^{0,652}$	0,455	14,169	-	0,600
$t_b = 0,374 \cdot A^{0,627}$	0,767	55,867	-	0,392
$t_b = 0,433 \cdot T_c^{0,189} \cdot A^{0,538}$	0,789	29,992	25,443	0,384
$t_b = 0,368 \cdot T_c^{0,320} \cdot L^{0,835}$	0,792	30,422	25,913	0,382

Dessa forma, a equação que atendeu a todos os testes de verificação e com o maior coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,792$ ) foi:

$$t_b = 0,368 \cdot T_c^{0,32} \cdot L^{0,835} \tag{1}$$

A Fig. 3 representa os resíduos gerados entre o  $t_b$  observado e o  $t_b$  previsto. De acordo com os resultados, o maior resíduo encontrado foi na barragem Figueiredo, com 18,4 h, e o menor na barragem de Olho D'água, com 0,17 h. Portanto, a barragem Figueiredo distanciou-se mais dos valores encontrados pelo método SCS, diferentemente da barragem Olho D'água, que apresentou forte semelhança com o método. Tal resultado indica que o tempo de base pode ser induzido por outros fatores que não foram considerados na Eq. 1.

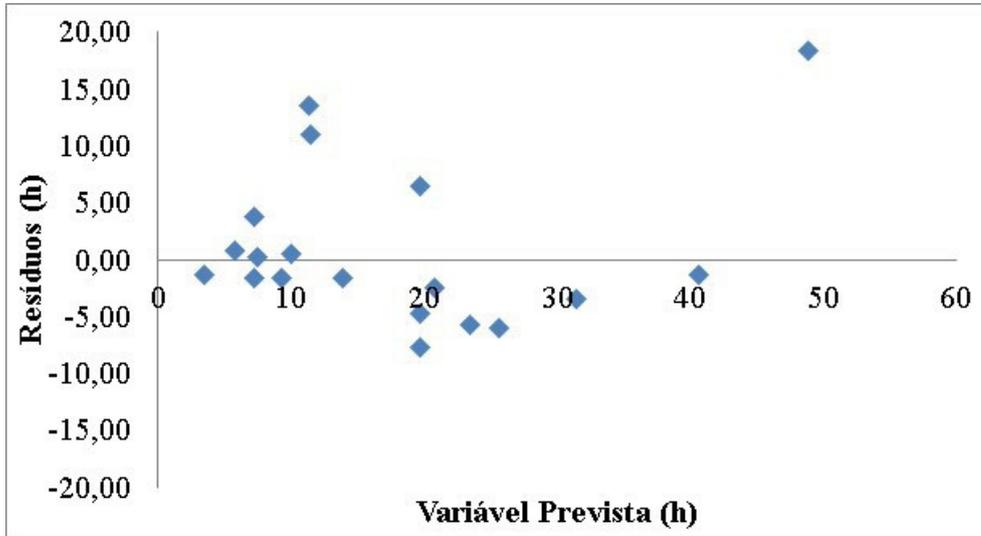


Figura 3 - Resíduos e os valores calculados de  $t_{p0}$  pela equação obtida.

A segunda variável dependente escolhida para os cálculos foi o tempo de pico ( $t_{p0}$ ) do hidrograma. Inicialmente foi elaborada a matriz de correlação entre as variáveis (Tabela 6).

Tabela 6 - Matriz de correlações para o tempo de pico ( $t_{p0}$ ).

Matriz de Correlações				
Variável	$t_{p0}$ (h)	$T_c$ (h)	A (km <sup>2</sup> )	L (km)
$t_{p0}$ (h)	1			
$T_c$ (h)	0,858	1		
A (km <sup>2</sup> )	0,834	0,692	1	
L (km)	0,778	0,560	0,953	1

Conforme a Tabela 6, os resultados obtidos mostraram novamente uma maior correlação linear entre as variáveis independentes  $T_c$ , A e a variável dependente  $t_{p0}$ . Na Tabela 7 são apresentados somente os resultados que passaram nos testes de verificação.

Tabela 7 - Equações para a variável dependente  $t_{p0}$ .

Equação	$r^2$	F Total	F parcial	$S_e$
$t_{p0} = 1,478 \cdot T_c^{0,652}$	0,455	14,204	-	0,599
$t_{p0} = 0,141 \cdot A^{0,627}$	0,767	56,142	-	0,391
$t_{p0} = 0,163 \cdot T_c^{0,189} \cdot A^{0,537}$	0,790	30,162	25,580	0,383

A regressão com o maior coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,790$ ) e que atende aos testes estatísticos foi:

$$t_{p0} = 0,163 \cdot T_c^{0,189} \cdot A^{0,537} \tag{2}$$

A Fig. 4 representa os resíduos gerados entre o  $t_{p0}$  observado e o  $t_{p0}$  previsto pelos valores da equação de regressão encontrada. De acordo com os resultados, o maior resíduo encontrado foi na barragem Figueiredo com 8,16 h e o menor na barragem de Parambu com -0,055 h. Novamente os valores indicam um considerável distanciamento da barragem Figueiredo em relação aos valores do método SCS.

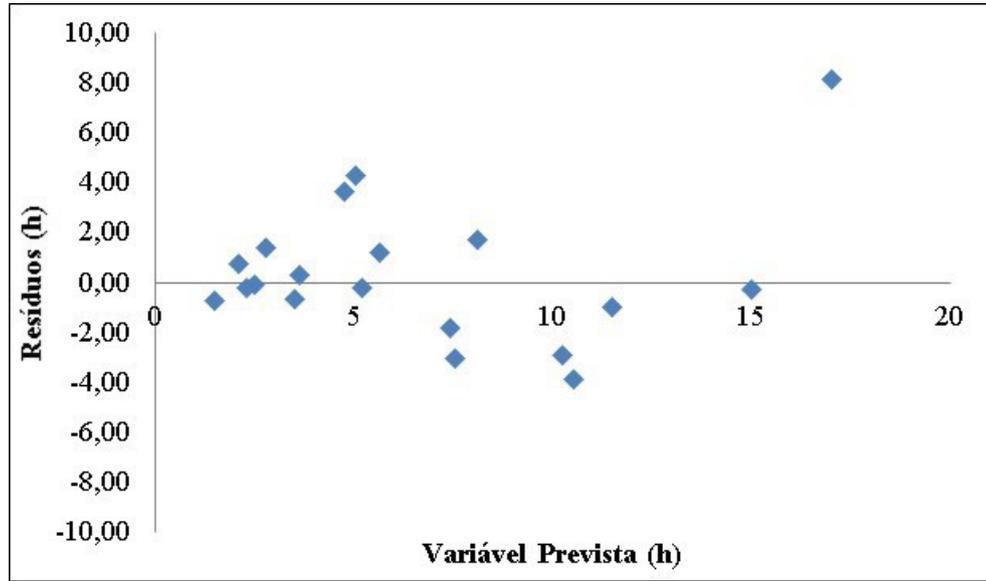


Figura 4 - Resíduos e valores calculados de  $tp_0$  pela equação obtida.

A última variável dependente escolhida para os cálculos foi a vazão ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) do hidrograma (Tabela 8).

Tabela 8 - Matriz de correlações para a vazão de pico ( $Q_{m\acute{a}x}$ ).

Matriz de Correlações				
Variável	$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	A (km <sup>2</sup> )	$T_c$ (h)	L (km)
$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	1			
A (km <sup>2</sup> )	0,657	1		
$T_c$ (h)	0,235	0,692	1	
L (km)	0,672	0,953	0,560	1

De acordo com a Tabela 8, os resultados obtidos mostraram uma maior correlação linear entre as variáveis independentes A, L e a variável dependente  $Q_{m\acute{a}x}$ . Além disso, essas mesmas variáveis independentes possuem alto grau de colinearidade. O coeficiente de correlação entre ambas foi de 0,953, por isso todas as equações envolvendo as variáveis A e L ao mesmo tempo foram descartadas.

A eliminação de A ou de L não foi baseada somente na maior correlação de L com  $Q_{m\acute{a}x}$  (0,672). Foi analisado também o coeficiente de determinação utilizando somente essas variáveis em função de  $Q_{m\acute{a}x}$ . A variável área (A) mostrou o

melhor resultado para o coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,539$ ). Na Tabela 9 são apresentados somente os resultados que passaram nos testes de verificação.

Tabela 9 - Equações para a variável dependente  $Q_{m\acute{a}x}$ .

Equação	$r^2$	F Total	$S_e$
$Q_{m\acute{a}x} = 1,401 \cdot L^{0,613}$	0,485	16,040	0,414
$Q_{m\acute{a}x} = 1,476 \cdot A^{0,373}$	0,539	19,902	0,392

A regressão escolhida para representar a variável  $Q_{m\acute{a}x}$  foi a seguinte:

$$Q_{m\acute{a}x} = 1,476 \cdot A^{0,373} \quad (3)$$

Portanto, a vazão máxima ficou em função da área da bacia. De modo geral, a área é a variável independente com maior peso na regressão e incorpora informações de outras características físicas da bacia (TUCCI, 2000; POLITANO e PIS-SARA, 2003). Além disso, Andrade et al. (2004) também regionalizaram vazões para o Estado do Ceará utilizando apenas as áreas das bacias.

A Fig. 5 representa os resíduos gerados entre o  $Q_{m\acute{a}x}$  observado e o  $Q_{m\acute{a}x}$  previsto pelos valores da equação de regressão encontrada. De acordo com os resultados, o maior resíduo encontrado foi na barra-

gem Missi com 13,72 m<sup>3</sup>/s e o menor na barragem de Parambu com 0,47 m<sup>3</sup>/s. Portanto, Missi apresentou um maior distanciamento entre os métodos analisados, enquanto Parambu teve o menor.

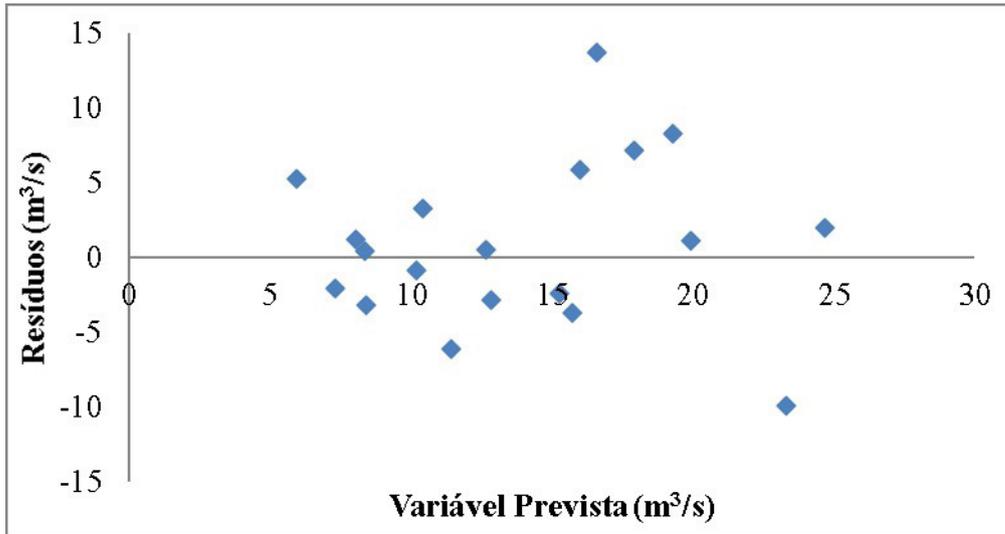


Figura 5 - Resíduos e valores calculados de  $Q_{m\acute{a}x}$  pela equação obtida.

A Tabela 10 apresenta um sumário das equações de regressão para as variáveis do hidrograma.

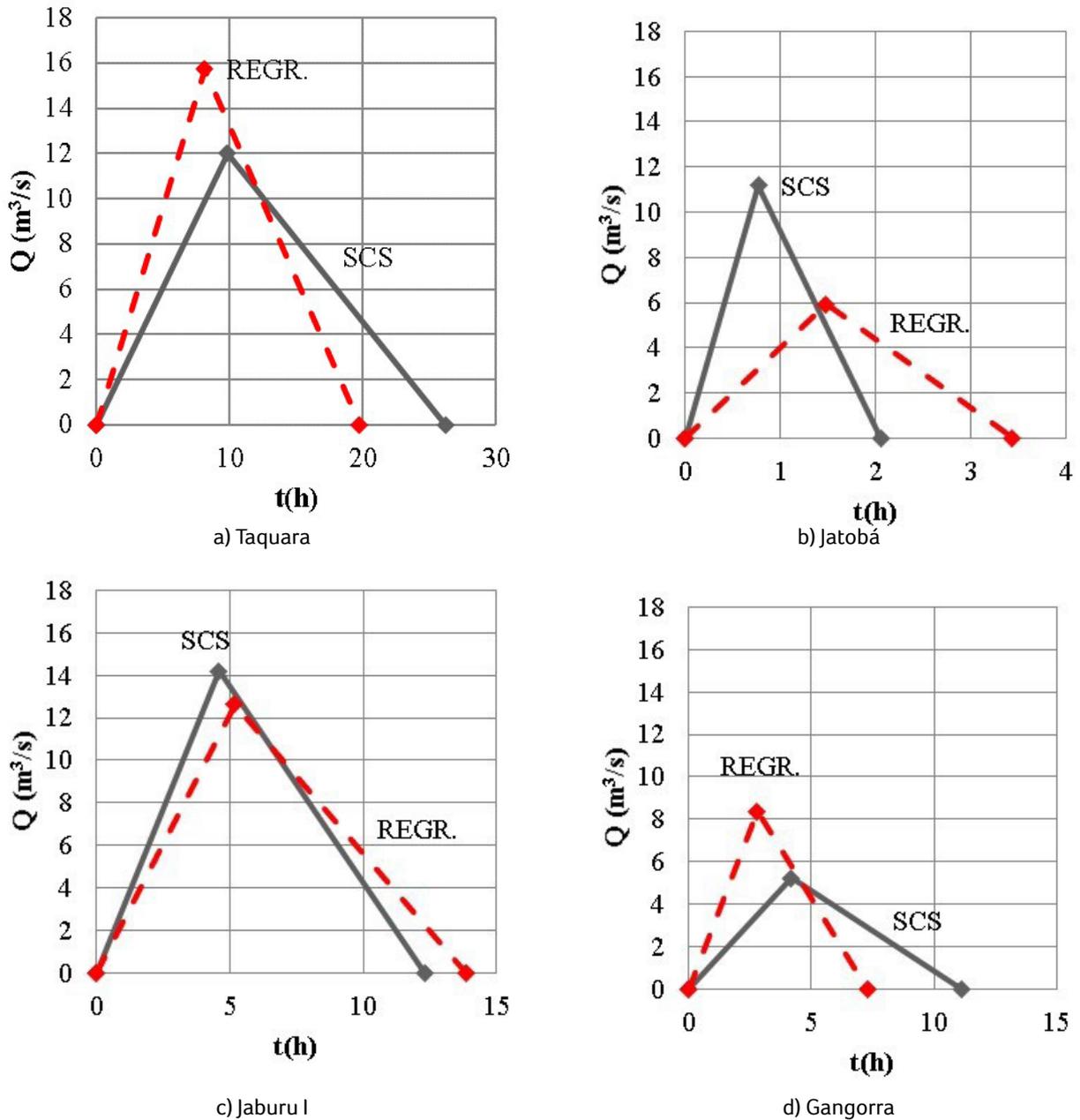
Tabela 10 - Sumário das equações de regressão para as variáveis do hidrograma.

Equação	r <sup>2</sup>	F Total	F parcial	S <sub>e</sub>	S <sub>y</sub>
$t_b = 0,368 \cdot T_c^{0,32} \cdot L^{0,835}$	0,792	30,42	25,91	0,38	0,79
$t_{p0} = 0,163 \cdot T_c^{0,189} \cdot A^{0,537}$	0,790	30,16	25,58	0,38	0,79
$Q_{m\acute{a}x} = 1,476 \cdot A^{0,373}$	0,539	19,90	-	0,39	0,56

Após a obtenção das equações de regressão para os três parâmetros do HUST, foram elaborados gráficos comparativos para cada barragem. Os gráficos a seguir sintetizam os hidrogramas ge-

rados pelo método do SCS e os hidrogramas gerados pelas equações de regressão obtidas.

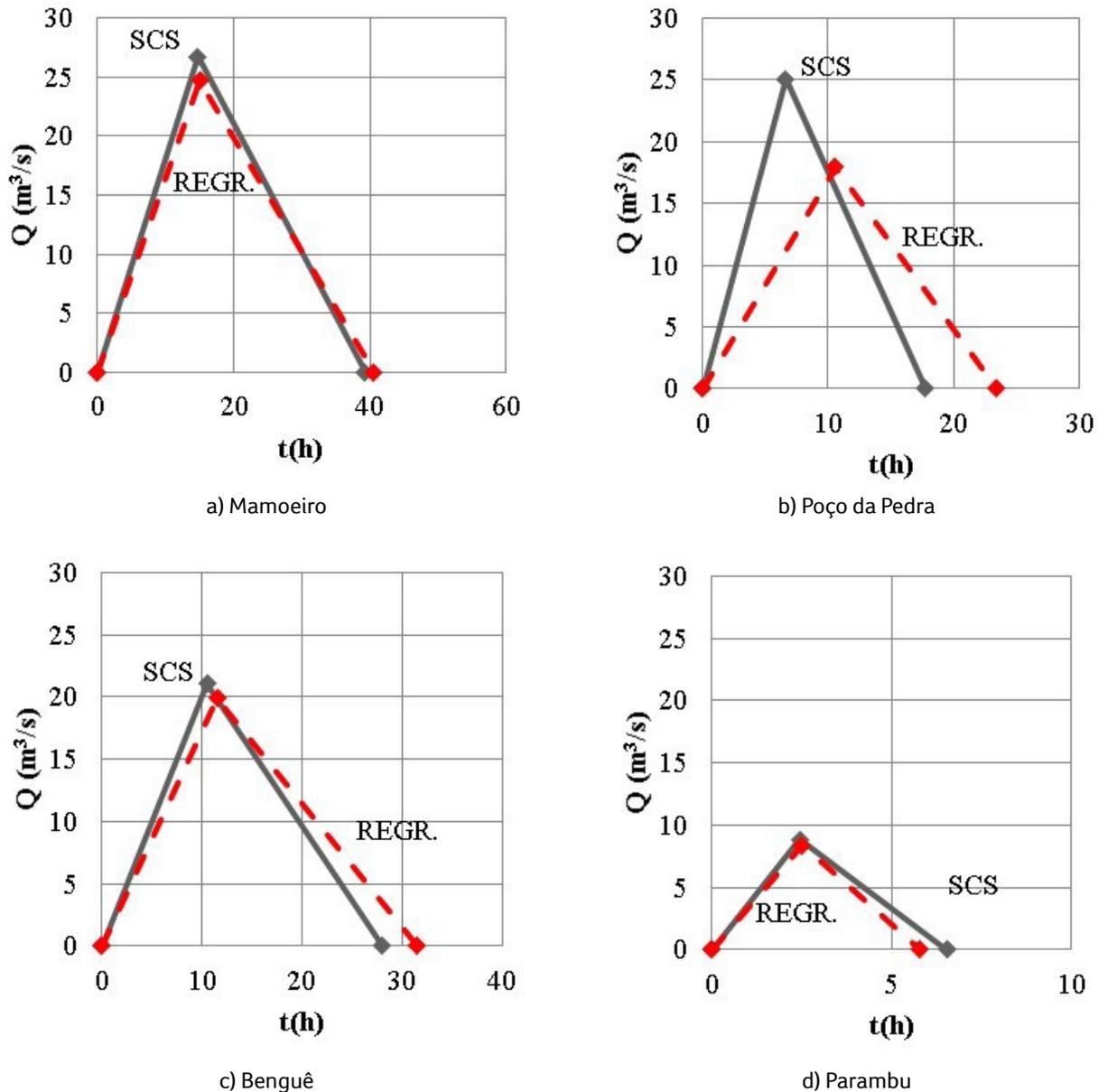
A Fig. 6 representa os hidrogramas das bacias que estão a Noroeste do Ceará. Na barragem Jaburu I, com um desvio de 5% nas vazões máximas e nos tempos de pico, é possível perceber que as equações propostas obtiveram resultados próximos com as equações do método SCS. De acordo com Leme et al. (2017), a barragem Jaburu I está sob rocha sedimentar, assim, o fluxo subterrâneo desenvolve-se e faz com que a taxa de esvaziamento do reservatório seja reduzida. Portanto, esse pode ser um dos motivos das regressões apresentarem bons resultados para essa barragem.



**Figura 6** - Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens das bacias do Coreaú, Acaraú e Serra da Ibiapaba.

A Fig. 7 representa os hidrogramas das bacias que estão a Sudoeste do Ceará. Nota-se que as equações de regressão obtiveram resultados próximos aos das equações do método SCS, com um desvio médio de 12% nas vazões de pico. Porém observou-se uma considerável diferença entre as regressões e o método SCS na barragem Poço da Pedra. Além disso, todas as vazões de pico foram menores do que as vazões do método

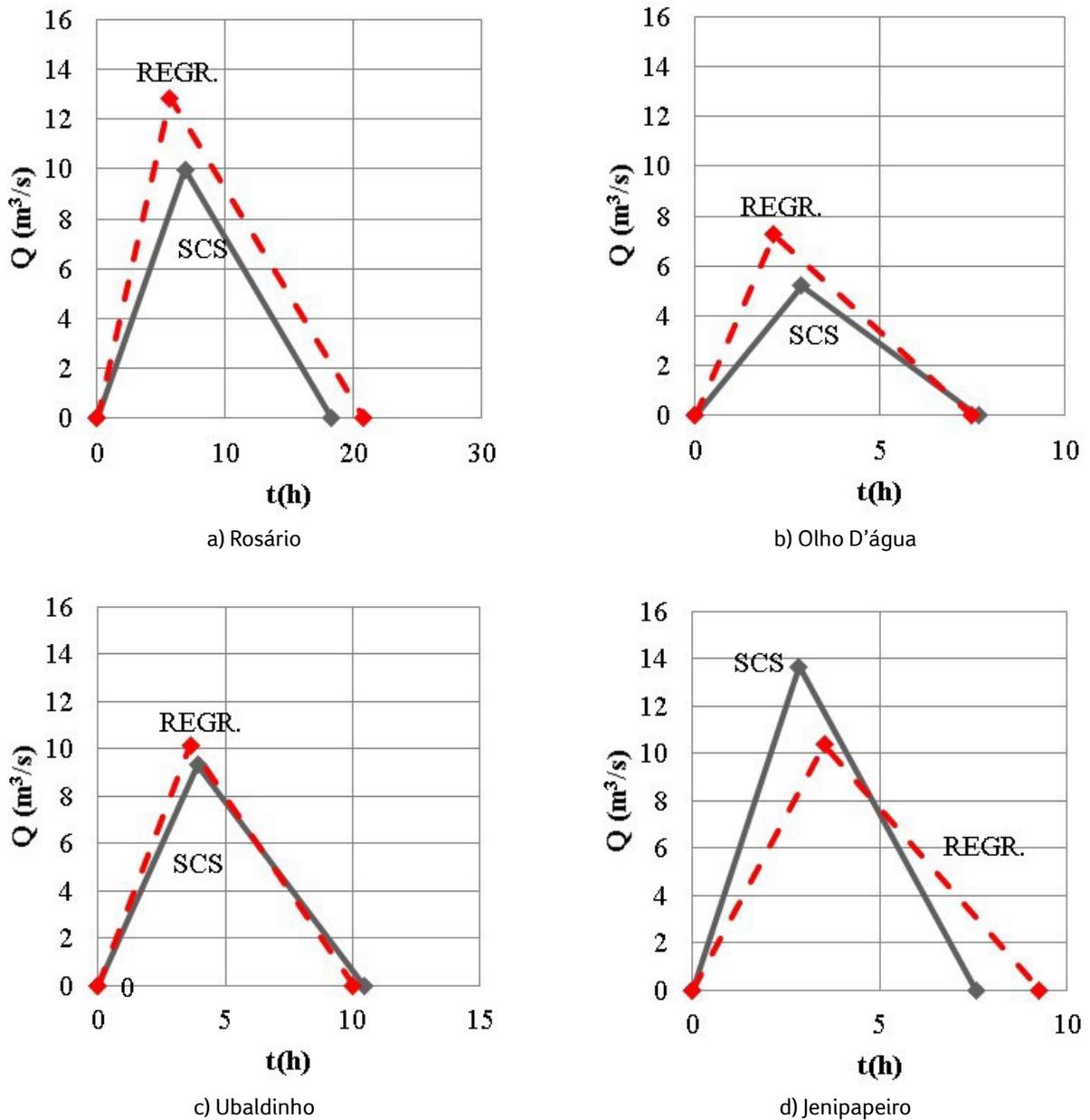
SCS, indicando, assim, uma tendência do modelo proposto em reduzir as vazões máximas para os reservatórios do Alto Jaguaribe. Essa tendência pode ser em decorrência da bacia do Alto Jaguaribe ser constituída de rochas do embasamento cristalino (cerca 81,28 % do seu território), contribuindo, assim, para o aumento da evaporação de água devido à dificuldade em infiltrar no solo (CEARÁ, 2009a).



**Figura 7** - Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens da bacia do Alto Jaguaribe.

A Fig. 8 representa os hidrogramas das bacias que estão a Sudeste do Ceará. Com um desvio médio de 11% nos tempos de base e 19% nos tempos de pico, percebe-se que os resultados obtidos para as barragens da bacia do Salgado estão próximos do método SCS. Entretanto, as vazões de pico

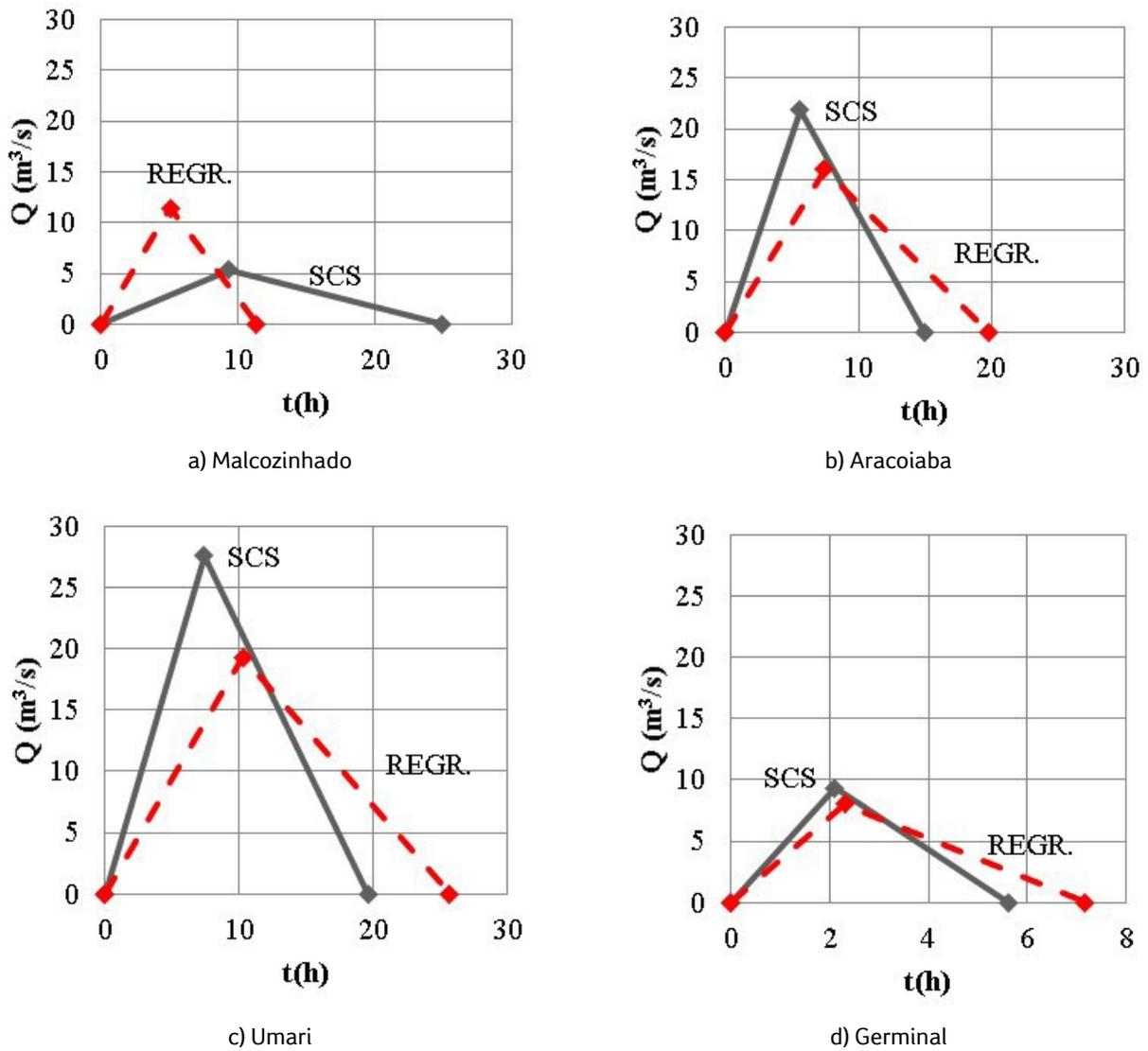
do modelo proposto estão maiores nas três primeiras barragens. Essas discrepâncias indicam valores mais conservadores para as equações de regressão, tendo como consequência obras superdimensionadas caso fossem utilizadas as equações propostas.



**Figura 8** - Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens da bacia do Salgado.

A Fig. 9 apresenta os resultados obtidos para a bacia Metropolitana e bacia do Banabuiú. Essas bacias são consideradas estratégicas para o gerenciamento dos recursos hídricos do estado (RODRIGUES, AQUINO, THOMAZ, 2017). Com um

desvio médio de 46% nas vazões máximas, os resultados das barragens não foram próximos dos valores encontrados pelo método SCS, indicando discrepâncias consideráveis no dimensionamento de estruturas de segurança hídrica.



**Figura 9** - Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens das bacias Metropolitana e Banabuiú.

As Fig. 10 e 11 apresentam os hidrogramas da bacia do Litoral e do Médio Jaguaribe. Nota-se para essas barragens o seguinte comportamen-

to: quando o modelo possui uma vazão de pico maior que o método SCS, seus tempos de pico e de base são inferiores aos do método SCS.

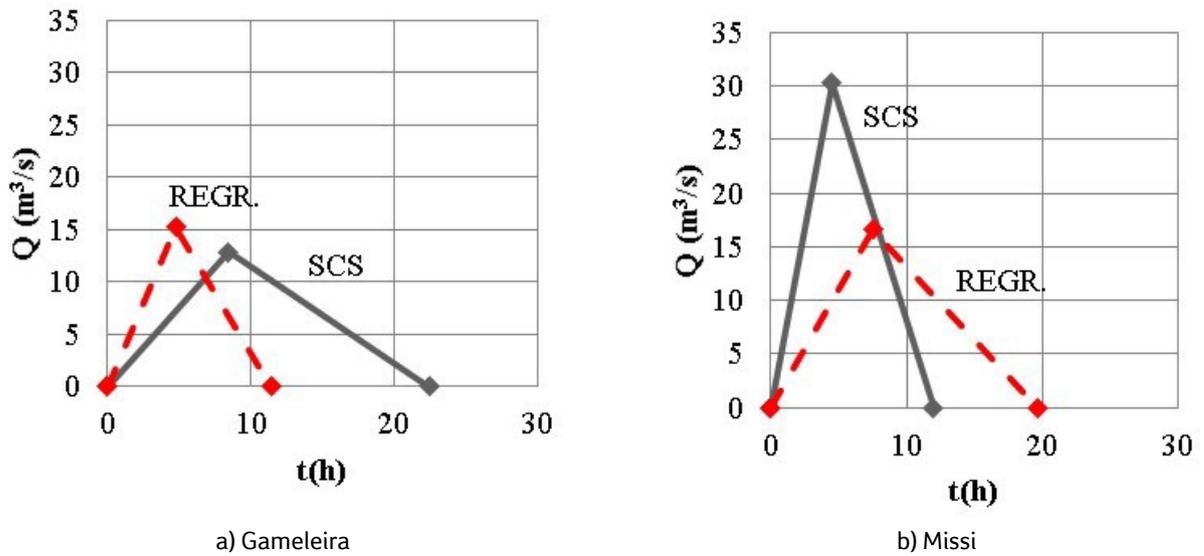


Figura 10 - Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para as barragens da bacia do Litoral.

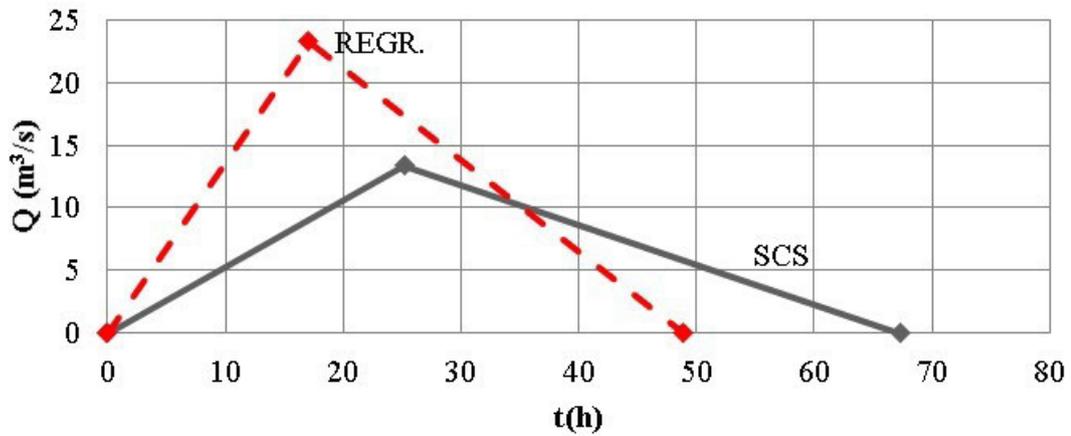


Figura 11 - Hidrograma obtido pelo método do SCS e pela regressão para a barragem Figueiredo da bacia do Médio Jaguaribe.

Os resultados das simulações para regionalização do HUST para as 19 barragens estudadas são resumidos na Tabela 11.

Os resultados correspondentes às vazões por área da bacia são apresentados na última coluna da Tabela 11. Essa relação demonstra o comportamento das vazões por unidade de área da bacia hidrográfica da barragem. Os resultados indicam que a área de drenagem contribui significativamente para o escoamento superficial em peque-

nas bacias (ANDRADE et al., 2004). Uma das possíveis explicações para tal comportamento está na relação direta entre a distribuição espacial das precipitações e a área da bacia. Além disso, quanto maior a bacia hidrográfica, maiores as interações existentes em seu interior, podendo diminuir, assim, o efeito da área de drenagem e aumentar a participação de outros fatores, como as águas subterrâneas, no balanço hídrico, conforme relatado por Tucci (2009).

**Tabela 11** - Parâmetros obtidos pelo modelo da regionalização.

Barragem	$t_b$ (h)	$t_{p0}$ (h)	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{max}/A$ (x 10 <sup>-8</sup> m/s)
Aracoiaba	19,7463	7,4364	15,9664	2,71
Benguê	31,5050	11,5038	19,9049	1,87
Figueiredo	48,8898	17,0389	23,3073	1,44
Gameleira	11,4169	4,7778	15,2420	2,93
Gangorra	7,2782	2,7800	8,3792	8,00
Germinal	7,1714	2,3046	8,0486	8,56
Jaburu I	13,8504	5,1863	12,6288	4,02
Jatobá	3,4317	1,4762	5,9246	14,3
Jenipapeiro	9,2490	3,5240	10,3930	5,58
Malcozinhado	11,3471	5,0556	11,4216	4,76
Mamoeiro	40,5925	15,0269	24,6709	1,31
Missi	19,6670	7,5354	16,5938	2,54
Olho D'água	7,4924	2,1154	7,2783	10,1
Parambu	5,7964	2,5053	8,3582	8,04
Poço da Pedra	23,3980	10,5301	17,9049	2,24
Rosário	20,8078	5,6531	12,8492	3,91
Taquara	19,7132	8,0931	15,7319	2,78
Ubalzinho	10,0140	3,6331	10,1725	5,78
Umari	25,6703	10,2684	19,2776	1,98

#### 4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A previsão do escoamento superficial em regiões secas, como no Ceará, permite um melhor dimensionamento nos projetos executivos de estruturas hídricas, bem como um melhor gerenciamento da oferta hídrica disponível para os seus diferentes usos. Dessa forma, o órgão gestor dos recursos hídricos adquire mais informações para a sua tomada de decisão, diminuindo as falhas e identificando melhor os riscos. Este trabalho teve como objetivo principal a modelagem de Hidrograma Unitário Sintético Triangular do SCS para regionalização, baseado em dados de algumas bacias hidrográficas cearenses.

Portanto, destaca-se neste trabalho a boa aproximação entre as equações de regressão e o método do hidrograma unitário sintético triangular, fato comprovado pelos testes estatísticos em cada caso. Conclui-se que a regionalização definida para essas bacias pode ser considerada consistente, uma vez que todos os modelos

foram validados pelos testes estatísticos ( $r^2$ ,  $F$  total,  $F$  parcial e  $S_e$ ). Os parâmetros que apresentaram os melhores resultados foram: área da bacia, tempo de concentração e comprimento do rio principal. Além disso, o modelo proposto é de fácil aplicação e pode ser utilizado como uma análise preliminar em projetos hidráulicos semelhantes. Portanto, diante dos testes estatísticos, destacam-se a consistência das equações encontradas e a facilidade em suas aplicações.

As equações não consideraram outras características fisiográficas importantes, como a declividade e a área da bacia hidráulica. Além disso, recomenda-se utilizar as equações obtidas em bacias com áreas de drenagem entre 41,38 e 1887,6 km<sup>2</sup>, tempo de concentração entre 1,1 e 36 h, comprimento de rio principal entre 9,6 e 107,63 km e um período de retorno de 1.000 anos. Qualquer caso que ultrapasse esses limites estará extrapolando o alcance das equações geradas.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pela bolsa concedida ao primeiro autor e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP (Processo PNE-0112-00042.01.00/16) pelo apoio financeiro para a realização do presente trabalho.

## 6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Conceituação:** Rocha JS, Malveira VTC e Neto IEL; **Metodologia:** Rocha JS, Malveira VTC e Neto IEL; **Redação – Primeira versão:** Rocha JS e Malveira VTC; **Redação – Revisão & Edição:** Rocha JS, Malveira VTC e Neto IEL; **Aquisição de Financiamento:** Rocha JS e Neto IEL; **Recursos:** Rocha JS e Carneiro BLDS; **Supervisão:** Neto IEL e Malveira VTC.

## 7 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. M.; PORTO, M. M.; COSTA, R. N. T.; MEIRELES, M.; NETO, J. A. C. Regionalização de modelos de vazões medias de longo período para o Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, v.35, p. 139-148, 2004.
- BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 612-624, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>
- BHUNYA, P. K.; PANDA, S. N.; GOEL, M. K. Synthetic unit hydrograph methods: a critical review. *The Open Hydrology Journal*, Bentham Open, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2011. <https://doi.org/10.2174/18-74378101105010001>
- CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C.; NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, Rio de Janeiro, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, 2016. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>
- CAMPOS, J. N. B.; RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. The bell-shaped unit hydrograph for overland planes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001465](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001465)
- CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Instituto de Estudos e Pesquisas Para Desenvolvimento Do Estado Do Ceará. *Caderno Regional da Sub-Bacia do Alto Jaguaribe*. Fortaleza: INESP, 2009a.
- DALRYMPLE, T., Manual of Hydrology: Part. 3. Flood-frequency analyses. Flood-flow Techniques, *Geological Survey Water Supply Paper 1543-A*, Washington, D.C., p. 1-80, 1960. <https://doi.org/10.3133/wsp1543A>
- ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. *Metodologia para regionalização de vazões*. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1985.
- INNOCENTE, C.; CHAFFE, P. L. B. Uma revisão preliminar sobre a aplicação do hidrograma unitário na pesquisa, no ensino e na engenharia. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 2017, Florianópolis, *Anais... Ciência e tecnologia da água: inovação e oportunidades para o desenvolvimento sustentável*, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.
- ISIK, S.; SINGH, V. Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.13, n. 9, p. 824-834, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10-84-0699\(2008\)13:9\(824\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10-84-0699(2008)13:9(824))
- LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. A comparison of low flow regionalisation methods: catchment grouping. *Journal of Hydrology*, v. 323, n. 1, p. 193-214, 2006. <https://doi.org/10.1-016/j.jhydrol.2005.09.001>
- LEME, R. F.; XAVIER, L. C. P.; LIMA, F. C.; CARNEIRO NETO, J. A.; TARGINO, D. L. L.; SOUSA, L. N.; RABELO, N. N.; SILVA, S. M. O. Influência do fluxo subterrâneo proveniente de bacia sedimentar na operação de reservatórios – estudo de caso: barragem Jaburu I. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 2017, Florianópolis, *Anais: Ciência e tecnologia da água: inovação e oportunidades para o desenvolvimento sustentável*, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.
- LIU, S.; XIE, Z.; ZENG, Y. Discharge estimation for an ungauged inland river in an arid area related to anthropogenic activities: a case study of Heihe river basin, northwestern China. *Advances in Meteorology*, v. 2016, n. 2, p. 1-11, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6716501>
- NAGHETTINI, M. *Introdução à hidrologia aplicada*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM- Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- PÁDUA, L.H. R. *Regionalização de hidrogramas unitários em bacias não monitoradas do estado de Minas Gerais*. 2015. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- PAGANO, T. C.; WOOD, A. W.; RAMOS, M. H.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F.; CLARK, M. P.; CRANSTON, M.; KAVETSKI, D.; MATHEVET, T.; SOROOSHIAN, S. E VERKADE, J. S. Challenges of Operational River Forecasting. American Meteorological Society.

**Journal of Hydrometeorology**. v. 15, n. 4. p. 1692-1707, 2014. <https://doi.org/10.1175/JHMD-13-0188.1>

POLITANO, W.; PISSARRA, T. Relações entre características morfo-métricas quantitativas e estimativas da vazão em função da área em microbacias hidrográficas de 2ª ordem de magnitude. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p. 179-186, 2003.

PORTO, R. L. L. Alguns aspectos da sùmula matemática em hidrologia: e exemplos de aplicação. **Revista DAE**, v. 111, v. 1, p. 111-144, 1977.

RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. Efeito de secas prolongadas nos recursos hídricos de uma região semiárida: uma análise comparativa para o Ceará. **Revista DAE**, v. 66, n. 212, p. 61-79, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.023>

RODRIGUES, M. V. S.; AQUINO, M. D.; THOMAZ, A. C. F. Seleção de variáveis em análise por envoltória de dados na análise da eficiência do instrumento da cobrança pela água bruta no setor do abastecimento público nas bacias cearenses por meio da ferramenta computacional SIAD (Sistema Integrado de Apoio à Decisão). **Revista DAE**, v. 65, n. 208, p. 5-20, 2017. <https://doi.org/10.4322/dae.2017.002>

SARHADI, A.; MODARRES, R. Flood seasonality-based regionalization methods: a data-based comparison. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 23, p. 3613-3624, 2011. <https://doi.org/10.1002/hyp.8088>

SCS - Soil Conservation Service. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1973.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ – SRH. **Sistema de informações dos recursos hídricos do Ceará**. 2018. Disponível em: <<http://atlas.srh.ce.gov.br/>>. Acesso em: 09 out. 2018.

SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, v. 61, n. 192, p. 48-59, 2013. <https://doi.org/10.4322/dae.2014.106>

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros do Hidrograma Unitário para as Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 8, n. 2. 195-199. 2003. <https://doi.org/10.21-168/rbrh.v8n2.p195-199>

TUCCI, C. E. M. **Regionalização das vazões**. Porto Alegre: IPH – UFRGS, 2000.

VIRÃES, M. V.; CIRILO, J. A. Regionalization of hydrological model parameters for the semi-arid region of the northeast Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 24, n. 49, p. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180114>

WOLFF, W. **Regionalização hidrológica do Estado de Santa Catarina: uma abordagem sazonal e geoestatística baseada em modelos**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

ZAMAN, M.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood modelling in arid and semi-arid regions in Australia. 19th International Congress on Modelling and Simulation, 19, 2011, **Sustaining our Future: Understanding and Living with Uncertainty**, Perth, Australia, 2011. p. 12-16.