EQUAÇÕES REGIONAIS PARA ESTIMATIVA DO DEFLÚVIO MÉDIO ANUAL NA SUB-BACIA 39: UMA ABORDAGEM POR DOMÍNIOS HIDROCLIMÁTICOS

Leonardo Maciel de Sousa [1]; Gerald Norbert Souza da Silva [2]

RESUMO – A estimativa do deflúvio médio anual em bacias não monitoradas é etapa essencial para o dimensionamento de reservatórios e a gestão integrada dos recursos hídricos. Neste estudo, foram desenvolvidas equações de regressão linear múltipla para estimar a lâmina escoada média anual (q) em duas regiões hidroclimaticamente distintas da Sub-Bacia 39, localizadas no Nordeste do Brasil: o Agreste semiárido e a Zona da Mata úmida. Utilizaram-se dados de 40 estações fluviométricas com séries de dados de vazão superiores a 10 anos, tendo como variáveis explicativas a precipitação média anual (P), a área da bacia (A) e o percentual de embasamento cristalino (C). As equações resultantes apresentaram bons ajustes, com coeficientes de determinação R^2 de 0,85 (Agreste) e 0,81 (Zona da Mata), e erros médios absolutos de 46 mm e 127 mm, respectivamente. A análise dos coeficientes revelou comportamentos hidrológicos coerentes com as características de cada domínio. Os resultados representam uma ferramenta prática e com embasamento físico para a estimativa do potencial hídrico de pequenos açudes na região.

ABSTRACT– Estimating mean annual runoff in ungauged basins is an essential step for reservoir design and integrated water resources management. In this study, multiple linear regression equations were developed to estimate the mean annual runoff depth (q) in two hydroclimatically distinct regions of Sub-Basin 40, Northeastern Brazil: the semiarid Agreste and the humid Zona da Mata. Data from 37 streamflow gauges with records longer than 10 years were used, with mean annual precipitation (P), drainage area (A) and percentage of crystalline basement (C) as explanatory variables. The resulting equations showed good fits, with determination coefficients R^2 of 0.85 (Agreste) and 0.81 (Zona da Mata) and mean absolute errors of 46 mm and 127 mm, respectively. The coefficient analysis revealed hydrological behaviors consistent with the characteristics of each domain. The results provide a practical and physically-based tool for estimating the water potential of small dams in the region.

Palavras-Chave – deflúvio médio anual; regressão linear múltipla; gestão de recursos hídricos.

[1]) Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Cidade Universitária, João Pessoa – PB, Brasil. CEP: 58051-900. E-mail: leonardo.maciel3@academico.ufpb.br
[2]) Professor Adjunto DECA-CT-UFPB, Campus I, CEP: 58051-900 - João Pessoa, gerald.silva@academico.ufpb.br

INTRODUÇÃO

O conhecimento do deflúvio médio anual, definido como volume de água que escoa superficialmente em uma bacia hidrográfica ao longo de um ano, podendo ser expresso como lâmina em milímetros, é informação fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. É a partir dessa grandeza, além de outras, que se dimensionam reservatórios fluviais e que em conjunto com dados de precipitação se avaliam disponibilidades hídricas médias anuais através do coeficiente de escoamento médio. Em regiões como o Nordeste brasileiro, onde a densidade de estações fluviométricas é baixa e a variabilidade climática é acentuada, a estimativa do deflúvio em bacias sem monitoramento representa um dos maiores desafios técnicos enfrentados por engenheiros e gestores.

A história da hidrologia nordestina tem um marco seminal: o trabalho do Engenheiro Francisco de Aguiar, que em 1934 propôs uma fórmula polinomial para o cálculo da lâmina escoada média anual a partir da precipitação e de um coeficiente de correção baseado nas características geomorfológicas da bacia (Aguiar, 1940). A equação de Aguiar, embora simples, representou um avanço notável para a época e foi adotada por décadas pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) (Campos, 2005). No entanto, a evolução da ciência hidrológica junto a técnicas de processamento computacional permitiu o desenvolvimento de métodos mais robustos, que possibilitam análises regionais com um maior número de bacias e que relacionam um maior número de características fisiográficas das bacias (Duarte et al., 2024).

A regressão linear múltipla é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas para a regionalização de vazões. Ela permite relacionar uma variável dependente (no caso, o deflúvio) a duas ou mais variáveis independentes (preditoras), como a precipitação, a área da bacia e características geológicas. Quando aplicada a grupos de bacias hidrologicamente homogêneas, essa abordagem produz equações que capturam os controles físicos dominantes do escoamento e podem ser aplicadas com relativa facilidade em bacias não monitoradas (Parajka et al., 2005; Arsenault & Brissette, 2014; Merz & Blöschl, 2011). A escolha adequada das variáveis preditoras é etapa crítica: elas devem ser facilmente mensuráveis e ter relação física direta com o processo chuva-vazão.

A Sub-Bacia 39, localizada entre os estados de Pernambuco, Alagoas e Paraíba, oferece um verdadeiro laboratório para o estudo da regionalização hidrológica. Em seu território de mais de 43 mil km², convivem dois regimes hidrológicos radicalmente distintos: a Zona da Mata, com clima úmido, precipitações anuais entre 1000 e 2000 mm e rios perenes; e o Agreste, inserido no semiárido, com chuvas entre 600 e 1000 mm e rios intermitentes. A geologia dominada por aquíferos fissurais

de baixa capacidade de armazenamento (78% da área) contrasta com os aquíferos porosos da faixa litorânea (19% da área) (CPRM, 2015; IBGE, 2023). Essa heterogeneidade impõe a necessidade de equações distintas para cada domínio, que capturem as especificidades de seus processos hidrológicos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar equações regionais para a estimativa do deflúvio médio anual na Sub-Bacia 39, desenvolvidas separadamente para os domínios do Agreste e da Zona da Mata (Figura 1), utilizando regressão linear múltipla padronizada com três variáveis preditoras: precipitação média anual, a área da bacia e o percentual de embasamento cristalino.

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A Sub-Bacia 39 ocupa uma área de 43.183 km², distribuída entre os estados de Pernambuco (66%), Alagoas (31%) e Paraíba (3%). Está subdividida em três domínios geográficos principais: Zona da Mata, Agreste e uma pequena porção do Sertão, no extremo oeste. A Zona da Mata, úmida e litorânea, contrasta com o Agreste semiárido, de vegetação típica de savana brasileira (caatinga) e rios intermitentes. Do ponto de vista hidrogeológico, predominam os aquíferos fissurais (78% da área), associados ao embasamento cristalino e rochas metassedimentares/metavulcânicas, caracterizados por possuir baixa capacidade de armazenamento hídrico subterrâneo. Os aquíferos porosos, concentrados na Zona da Mata, especificamente na faixa litorânea, combinados a índices pluviométricos mais elevados, tendem a sustentar por mais tempo a perenidade dos rios nesse domínio (CPRM, 2015; IBGE, 2023).

DADOS E VARIÁVEIS

Foram utilizados dados de vazão e características fisiográficas de 40 estações fluviométricas com séries históricas superiores a 10 anos, sendo 18 localizadas predominantemente no Agreste e 22 na Zona da Mata (Tabela 1). Para cada estação, foram obtidas as séries de vazões observadas, na plataforma HIDROWEB da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os dados de precipitação e atributos físicos das bacias foram obtidos na plataforma HecIMS (https://hecims.netlify.app/), desenvolvida na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e disponibilizada gratuitamente online (SOUSA, 2024). As variáveis preditoras selecionadas foram: precipitação média anual (P, mm/ano), área da bacia (A, km²) e percentual de embasamento cristalino (C, %). Os resultados dos processamentos das bacias de drenagem das 40 estações fluviométricas analisadas estão apresentados na Tabela 1.

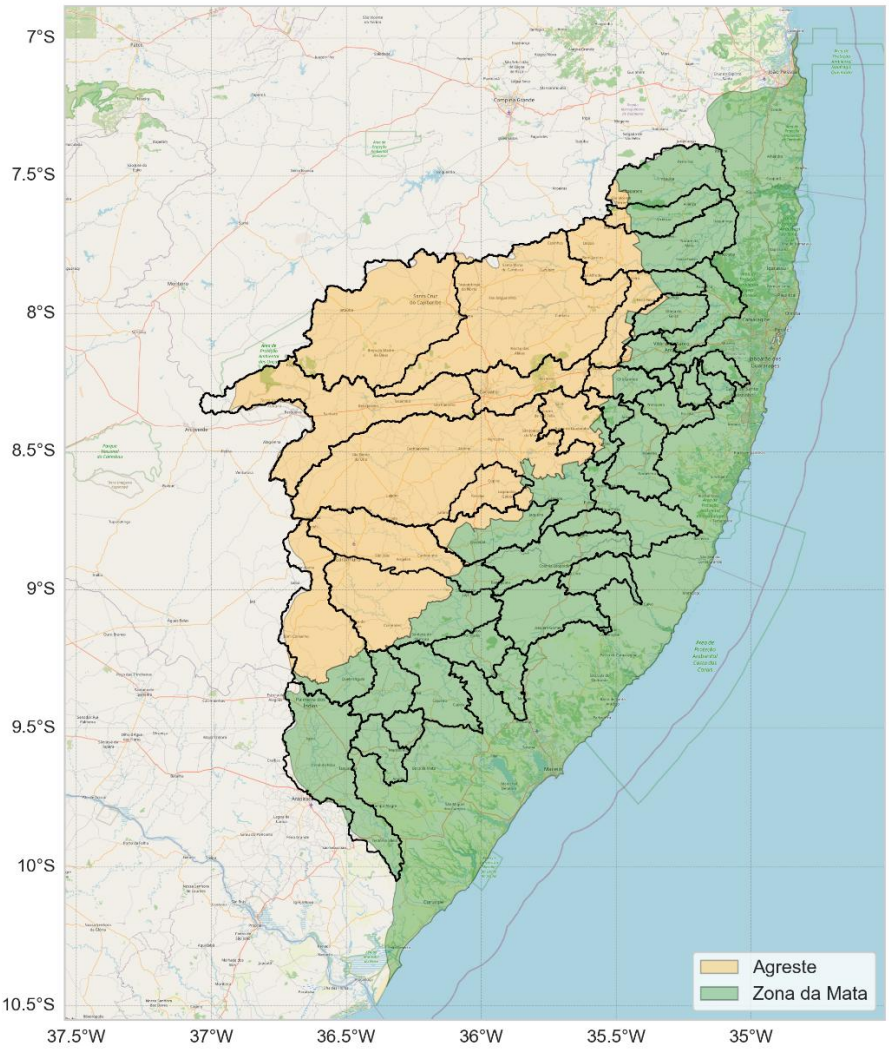


Figura 1 – Localização da Área de Estudo (Sub-Bacia 39),
em cor verde a Zona da Mata úmida e em laranja o domínio do Agreste semiárido.
Os contornos pretos são os divisores de água das bacias analisadas neste estudo
(Fonte: Elaboração própria, 2026).

ANÁLISE DE REGRESSÃO

Para cada domínio, as variáveis preditoras foram padronizadas (subtração da média e divisão pelo desvio padrão) a fim de eliminar diferenças de escala e permitir a comparação direta dos coeficientes. Em seguida, ajustou-se um modelo de regressão linear múltipla na forma:

$$q = \beta_0 + \beta_1 \cdot \boldsymbol{P} + \beta_2 \cdot \boldsymbol{A} + \beta_3 \cdot \boldsymbol{C}$$

Onde:

- q – deflúvio médio anual estimado, expresso como lâmina de água em milímetros por ano (mm ano^{-1}). Representa o volume total escoado pela bacia ao longo de um ano, distribuído uniformemente sobre sua área;
- P – precipitação média anual na bacia hidrográfica, em milímetros por ano (mm ano^{-1});
- A – área de drenagem da bacia hidrográfica, em quilômetros quadrados (km^2);

- C – percentual da área da bacia coberta por embasamento cristalino, expresso em porcentagem (%);
- β_0 – intercepto ou termo constante, em milímetros por ano (mm ano^{-1}). Em modelos ambientais, é comum que o intercepto assuma valores negativos, indicando que a equação é válida apenas dentro do intervalo dos dados amostrais e não deve ser extrapolada para bacias com características extremas;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – coeficientes de regressão associados a cada variável preditora. Os coeficientes quantificam a contribuição individual de cada fator para o deflúvio: para cada aumento unitário na variável independente, o deflúvio se altera em β_i unidades, mantendo as demais variáveis constantes.

Os coeficientes da equação foram então convertidos de volta à escala original para facilitar a aplicação prática. A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo erro médio absoluto (MAE). Os mapas de erros foram elaborados a partir dos contornos das bacias de drenagem, classificando-se visualmente as diferenças absolutas entre os deflúvios observado e calculado (q).

Tabela 1 – Características fisiográficas das bacias monitoradas pelas 40 estações fluviométricas.

Estação Fluviométrica	Domínio Hidroclimático Predominante	Área da bacia (km²)	Porcentagem no Cristalino %	Chuva Média Anual (mm)	Deflúvio Médio Anual (mm)
BARREIROS	Agreste	6550	79	1036	276
BELÉM DE MARIA	Agreste	388	100	562	173
CARUARU	Agreste	2000	74	748	64
ENGENHO BENTO	Agreste	537	100	1244	582
ENGENHO MARANHÃO	Agreste	3310	83	734	207
ENGENHO TABOCAS	Agreste	2960	82	743	98
FAZENDA BOA FORTUNA	Agreste	3560	76	1203	285
GRAVATÁ	Agreste	2650	79	684	36
LIMOEIRO	Agreste	5580	68	732	59
MURICI - PONTE	Agreste	3290	75	1118	456
PALMARES	Agreste	4910	83	820	308
PAUDALHO	Agreste	6190	67	634	39
SÃO JOSÉ DA LAJE	Agreste	1170	74	605	77

SÃO LOURENÇO DA MATA II	Agreste	7290	67	618	71
TORITAMA	Agreste	2450	71	681	68
UNIÃO DOS PALMARES	Agreste	2900	72	880	254
VILA SÃO FRANCISCO	Agreste	1510	50	820	31
VIÇOSA	Agreste	1970	55	1003	151
AMARAGI	Zona da Mata	139	100	1152	1117
ATALAIA	Zona da Mata	2600	64	1170	306
CACHOEIRA TAPADA	Zona da Mata	90	100	1176	1140
CAMAÇARI	Zona da Mata	1440	41	1001	175
CARICÉ	Zona da Mata	1320	62	1099	313
CATENDE	Zona da Mata	718	69	973	443
DESTILARIA BOM JESUS	Zona da Mata	149	92	1817	1022
DESTILARIA INEXPORT	Zona da Mata	235	100	1557	1165
DESTILARIA JB-II	Zona da Mata	48	100	1062	764
ENGENHO FLORESCENTE	Zona da Mata	181	40	1551	557
ENGENHO ITAPISSIRICA	Zona da Mata	1230	61	1226	216
ENGENHO MATO GROSSO	Zona da Mata	1310	88	1765	792
ENGENHO RETIRO	Zona da Mata	472	36	1185	325
ENGENHO SÍTIO	Zona da Mata	376	49	834	175
FAZENDA SÃO PEDRO	Zona da Mata	320	37	1277	348
JACUÍPE	Zona da Mata	756	73	1441	695
MATRIZ DE CAMARAGIBE	Zona da Mata	787	96	1285	962
MATRIZ DE CAMARAGIBE II	Zona da Mata	805	95	1145	713
PIRAPAMA	Zona da Mata	372	100	1744	1695
PORANGABA	Zona da Mata	173	94	1270	1015
PORTO CALVO	Zona da Mata	342	93	1433	694
VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	Zona da Mata	264	85	856	320

Fonte: Elaboração própria, 2026.

RESULTADOS

EQUAÇÕES REGIONAIS

As equações obtidas para cada domínio são apresentadas a seguir. A Figura 2 complementa essa apresentação, mostrando a dispersão entre os deflúvios observados e os calculados. É fundamental destacar que **a reta tracejada preta exibida nos gráficos não representa a equação do modelo**. Ela é apenas uma linha de regressão linear simples, traçada entre os valores observados e calculados para auxiliar a inspeção visual de tendências. O desempenho real do modelo é quantificado pelo **coeficiente de determinação (R^2)** e pelo erro **médio absoluto (MAE)**, que medem a concordância entre os valores estimados pela equação de regressão múltipla e os dados observados, e não o ajuste dessa reta auxiliar. Portanto, a qualidade do modelo é avaliada pela proximidade dos pontos à linha de referência 1:1 (cinza), e não à linha tracejada preta.

- *Domínio do Agreste (R^2 = 0,85; MAE = 46 mm/ano):*

$$q_{Agreste} = -742{,}6 + 0{,}5581 \cdot \boldsymbol{P} + 0{,}0034 \cdot \boldsymbol{A} + 5{,}9793 \cdot \boldsymbol{C}$$

- *Domínio da Zona da Mata (R^2 = 0,81; MAE = 127 mm/ano):*

$$q_{Zona\ da\ Mata} = -758{,}9 + 0{,}5999 \cdot \boldsymbol{P} - 0{,}1455 \cdot \boldsymbol{A} + 10{,}0993 \cdot \boldsymbol{C}$$

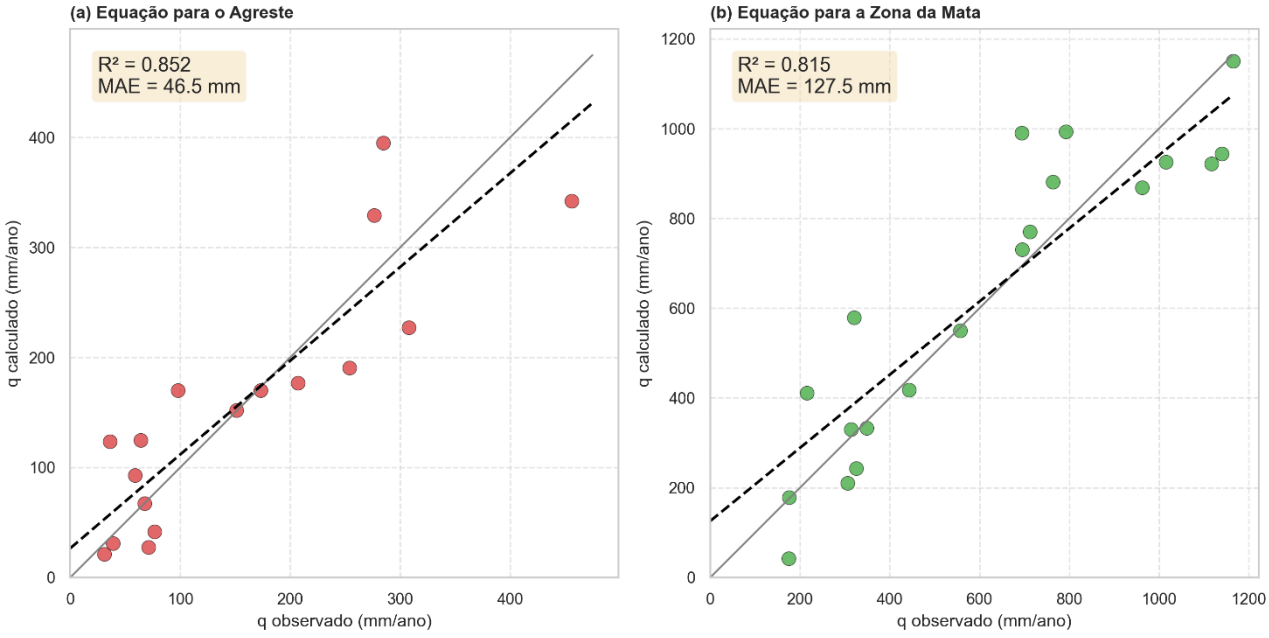


Figura 2 – Comparação entre o deflúvio médio anual observado (q_obs) e o calculado (q_calc) pelas equações regionais para os domínios (a) Agreste e (b) Zona da Mata. A linha contínua cinza representa a condição de ajuste perfeito (1:1); a reta tracejada preta é uma linha de tendência linear simples entre q_obs e q_calc, incluída apenas como auxílio visual, e **não corresponde à equação de regressão múltipla apresentada no texto**. Os valores de R^2 e MAE indicados em cada painel quantificam a concordância entre os deflúvios observados e os estimados pelo modelo (Fonte: Elaboração própria, 2026).

.

Os coeficientes de determinação indicam que o modelo explica aproximadamente 85% da variabilidade do deflúvio no Agreste e 81% na Zona da Mata, sendo valores considerados bons para estudos hidrológicos. A Figura 3 apresenta a distribuição espacial do erro absoluto (|q_observada − q_calculada|) nos dois domínios, evidenciando que os maiores erros se concentram em algumas bacias da Zona da Mata com deflúvios estimados excepcionalmente altos.

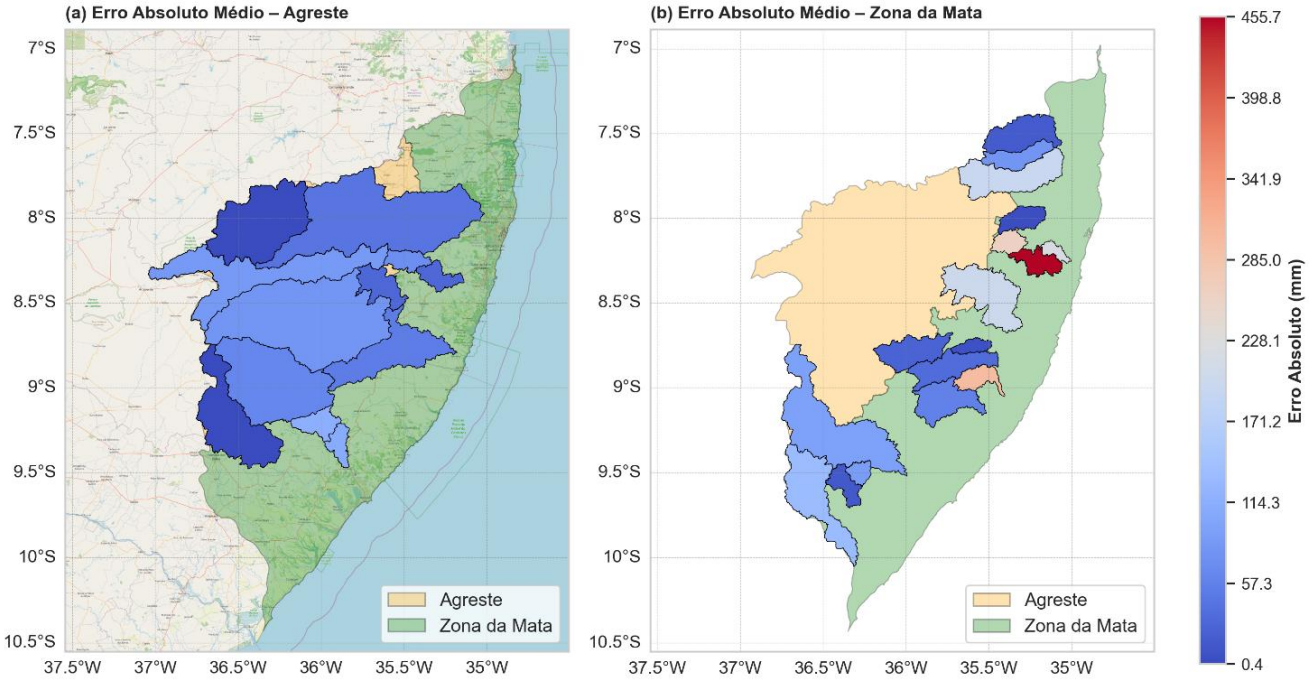


Figura 3 – Distribuição espacial do erro absoluto (|q_obs − q_calc|, em mm ano^{-1}) entre o deflúvio observado e o calculado pelas equações regionais nos domínios (a) Agreste e (b) Zona da Mata. A gradação de cores, do azul (menor erro) ao vermelho (maior erro), evidencia as bacias onde o modelo apresenta maior ou menor aderência aos valores observados (Fonte: Elaboração própria, 2026).

INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES REGIONAIS

Os valores dos coeficientes, revelam padrões distintos entre os dois domínios hidroclimáticos, cuja interpretação deve considerar as limitações inerentes ao método de regressão linear múltipla. As observações a seguir descrevem as relações estatísticas encontradas, evitando inferências causais que os dados não permitem sustentar. **Efeito da precipitação (β_1).** O coeficiente associado à precipitação média anual é positivo e de magnitude semelhante nos dois domínios (0,558 no Agreste e 0,600 na Zona da Mata). Isso indica que, mantidas constantes a área e a fração de cristalino, um acréscimo de 100 mm na chuva anual está associado a um aumento de aproximadamente 56 a 60 mm no deflúvio. A proximidade entre os valores sugere que a fração incremental da chuva convertida em escoamento superficial é comparável nos dois ambientes, apesar das diferenças fisiográficas entre eles.

Efeito da área da bacia (β_2). O sinal do coeficiente de área difere entre os domínios: é positivo no Agreste (0,0034) e negativo na Zona da Mata (−0,1455). Em outras palavras, para bacias com mesma precipitação e mesmo percentual de cristalino, o aumento da área está associado a um

ligeiro acréscimo no deflúvio específico no Agreste, mas a uma redução na Zona da Mata. A magnitude reduzida dos coeficientes indica que, após controlar o efeito da chuva e da geologia, a área exerce influência secundária sobre o deflúvio. As razões para essa diferença de sinal não podem ser determinadas exclusivamente a partir dos dados disponíveis; estudos complementares, com maior detalhamento dos processos físicos, seriam necessários para esclarecer os mecanismos envolvidos.

Efeito do embasamento cristalino (β_3). O percentual de área sobre embasamento cristalino apresentou coeficiente positivo em ambos os domínios, confirmando a tendência esperada de que terrenos menos permeáveis favorecem o escoamento superficial. O valor mais elevado na Zona da Mata (10,1 contra 6,0 no Agreste) indica que a mesma variação percentual de cristalino está associada a um incremento maior no deflúvio nesse domínio. Embora esse resultado seja coerente com a hipótese de que, em ambientes mais úmidos, o efeito da impermeabilidade do substrato seja mais pronunciado, a confirmação dessa hipótese exigiria investigações adicionais, como a análise da distribuição espacial dos solos e da profundidade do embasamento.

Sobre os interceptos negativos. Os interceptos das equações (~ −743 mm no Agreste e −759 mm na Zona da Mata) são negativos e de grande magnitude. Esse comportamento é comum em regressões múltiplas aplicadas a dados ambientais e reflete o fato de que o modelo é válido apenas dentro do intervalo dos dados observados. A extrapolação para condições muito distintas daquelas utilizadas no ajuste (por exemplo, precipitações inferiores a 600 mm no Agreste) deve ser evitada.

Desempenho comparativo entre domínios. O ajuste obtido para o Agreste ($R^2 = 0,85$; MAE = 46,5 mm) foi superior ao da Zona da Mata ($R^2 = 0,81$; MAE = 127,5 mm). A diferença de MAE é parcialmente explicada pela presença, na Zona da Mata, de bacias com deflúvios superiores a 1000 mm ano^{-1}, cujos erros absolutos são naturalmente maiores em termos absolutos. Ainda assim, ambos os modelos apresentam desempenho compatível com o reportado em estudos de regionalização hidrológica em regiões semiáridas e de transição climática.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou equações regionais para a estimativa do deflúvio médio anual nos dois domínios hidroclimáticos da Sub-Bacia 39. As relações obtidas mostram que a precipitação é o principal fator controlador do escoamento, mas que a geologia (percentual de cristalino) e, em menor grau, a área da bacia modulam significativamente a resposta hidrológica. A distinção entre Agreste e Zona da Mata mostrou-se justificada, tendo em vista os diferentes sinais do coeficiente de área e as magnitudes contrastantes do coeficiente do percentual de embasamento cristalino. As equações desenvolvidas constituem uma ferramenta prática para a estimativa do deflúvio médio anual em

bacias não monitoradas da Sub-Bacia 39, especialmente úteis em estudos de inventário hídrico e anteprojeto de pequenos reservatórios. Recomenda-se, no entanto, cautela em sua aplicação. Primeiramente, as equações não devem ser extrapoladas para bacias com características físicas ou climáticas muito distintas daquelas utilizadas no ajuste, particularmente precipitações inferiores a 600 mm no Agreste ou superiores a 1800 mm na Zona da Mata. Em segundo lugar, a equação da Zona da Mata apresenta maior incerteza (MAE de 127 mm), devendo ser empregada com reservas em projetos que exijam estimativas mais precisas. Por fim, as equações refletem exclusivamente os controles de precipitação, área e geologia, desconsiderando outros fatores relevantes como a presença de açudes a montante e as alterações no uso do solo, que podem modificar substancialmente o regime de escoamento. Estudos futuros poderão incorporar variáveis adicionais que capturem esses efeitos e refinar as estimativas, sobretudo para as bacias mais úmida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, F. de. Estudo hidrológico do Nordeste Brasileiro. Boletim IFOCS, Rio de Janeiro, v.13, n.1, 1940.
- ARSENAULT, R.; BRISSETTE, F. P. **Continuous streamflow prediction in ungauged basins: the effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches.** *Water Resources Research*, v. 50, p. 6135–6153, 2014. DOI: 10.1002/2013WR014898.
- CAMPOS, J. N. B. **Dimensionamento de reservatórios**: o método do diagrama triangular de regularização. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005. 112 p.
- DUARTE, S. N.; WOLFF, W.; NASCIMENTO, J. G.; LOPES, T. R.; CHARLES, T. S.; MARQUES, P. A. A.; PACHECO, A. B.; RICARDO, H. C. Regionalização de vazão no Brasil: métodos tradicionais e estado da arte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 28, n. 9, e276836, 2024.
- IBGE. Banco de dados e informações ambientais (BDiA): mapeamento de recursos naturais (MRN): escala 1:250 000: versão 2023: nota metodológica. Rio de Janeiro, 2023.
- MERZ, R.; BLÖSCHL, G. **Time stability of catchment model parameters: implications for climate impact analyses.** *Water Resources Research*, v. 47, W02531, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009505.
- PARAJKA, J.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. **A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 9, p. 157–171, 2005.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 39** / execução técnica e autoria de Keyla Almeida dos Santos. Recife: CPRM, 2015. 152 p.
- SOUSA, L. M.; SILVA, G. N. S.; REGO, A. M. S. Sistema computacional de informação e modelagem hidro-edafoclimática (HECIMS) para o Brasil. **Anais do XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, João Pessoa-PB, 2024.