









Artigo

Aplicação da Análise Fatorial para Determinação da Vulnerabilidade Hidrometeorológica para o Sub Médio São Francisco

Lorena Conceição Paiva de Ataíde^{1,2} , Madson Tavares Silva¹ ,
Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão^{1,3} , Leydson Galvêncio Dantas¹ ,
Gabio Stalin Soares Almeida¹ , João Hugo Baracuy da Cunha Campos⁴ ,
Vicente de Paulo Rodrigues da Silva¹ , Fabrício Daniel dos Santos Silva⁵ 

¹*Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

²*Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.*

³*Geologia Ambiental e Recursos Hídricos, Instituto Tecnológico Vale, Belém, PA, Brasil.*

⁴*Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, PB, Brasil.*

⁵*Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil.*

Recebido em: 25 de Fevereiro de 2021 - Aceito em: 3 de Outubro de 2022

Resumo

A vulnerabilidade dos recursos hídricos à curto e longo prazo está relacionada à diversos fatores como alterações no uso e cobertura da terra e mudanças climáticas. Dada a necessidade de mais informações para auxiliar na gestão da seca e no planejamento do uso da água no semiárido brasileiro, este trabalho segue duas linhas: (I) Analisar a variabilidade espaço-temporal das componentes hidroclimáticas da Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco; (II) Criar um Índice de Vulnerabilidade Hídrica a partir da análise fatorial. Foram identificados dois fatores predominantes na bacia, solo e clima, os quais são constituídos por variáveis hidroclimáticas distribuídas espaço e temporalmente. Com o IVH, foi possível identificar as áreas que possuem o menor índice, ou seja, aquelas que são mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, indicando que com a instabilidade no regime de chuvas deverá ocorrer menor recarga dos aquíferos, impedindo que, na época da estiagem, os reservatórios continuem a manter sua produção para o abastecimento, podendo ainda, apresentar riscos como aumento da temperatura e alterações no regime hídrico.

Palavras-chave: Submédio São Francisco, déficit hídrico, vulnerabilidade hídrica.

Application of Factor Analysis to Determine Hydrometeorological Vulnerability for the Middle São Francisco

Abstract

The vulnerability of water resources in the short and long term is related to several factors such as changes in land use and cover and climate change. Given the need for more information to assist in drought management and water use planning in the Brazilian semi-arid region, this work follows two lines: (I) To analyze the spatio-temporal variability of the hydroclimatic components of the Submédio São Francisco Watershed; (II) Create a Water Vulnerability Index from factor analysis. Two predominant factors were identified in the basin, soil and climate, which are constituted by hydroclimatic variables distributed in space and time. With the IVH, it was possible to identify the areas that have the lowest index, that is, those that are more vulnerable to the effects of climate change, indicating that with the instability in the rainfall regime, there should be less recharge of the aquifers, preventing that, at the time of the drought, the reservoirs continue to maintain their production for supply, and may also present risks such as increased temperature and changes in the water regime.

Keywords: Middle São Francisco River, water deficit, water vulnerability.

1. Introdução

A água é um recurso natural essencial para a manutenção da vida e desenvolvimento da sociedade. Ela pode ser vista como um recurso para uso doméstico, como um insumo na agricultura, indústria e energia, um sustentador de ecossistemas, bem como um risco na forma de eventos extremos (Brown *et al.*, 2015; de Oliveira Serrão *et al.*, 2020). A água tem usos múltiplos e sua disponibilidade no futuro poderá ter restrições para a produção agropecuária, industrial, serviços e até abastecimento humano (Anandhi *et al.*, 2016). Cada uso tem particularidades associadas às características qualitativas da água, os quais alteram o estado natural das águas superficiais e subterrâneas (ANA, 2020). Compreender o sistema de recursos hídricos e sua exposição a fatores que coloquem em risco a disponibilidade hídrica é vital para garantir um gerenciamento sustentável. Entre muitos fatores estressantes, mudanças no uso e cobertura da terra e no clima estão exercendo pressão sobre os sistemas de recursos hídricos, aumentando sua demanda e criando uma necessidade de avaliações de vulnerabilidade (Anandhi e Kannan, 2018; de Oliveira Serrão *et al.*, 2020).

A vulnerabilidade dos recursos hídricos a curto e longo prazo está relacionada a diversos fatores como alterações no uso e cobertura da terra (Nepstad *et al.*, 2014; Pandey *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2018; de Oliveira Serrão *et al.*, 2020) e mudanças climáticas (Sampaio *et al.*, 2007; Lewis *et al.*, 2015; Anandhi e Kannan, 2018; Chen *et al.*, 2019). De forma geral há uma grande incerteza em relação aos efeitos de alterações climáticas nos recursos hídricos do Brasil (Roland *et al.*, 2012). Além da mudança climática e alteração no uso da terra, outros fatores implicam na disponibilidade dos recursos hídricos, como crescimento populacional, desenvolvimento socioeconômico, avanço da agricultura irrigada e políticas de uso e conservação da água têm impactos diretos no aumento da demanda de água e na vulnerabilidade ao recurso (Zurovec *et al.*, 2017; Anandhi e Kannan, 2018; Chen *et al.*, 2019; de Oliveira Serrão *et al.*, 2021).

A vulnerabilidade é um conceito teórico, difícil de ser mensurado (Tonmoy *et al.*, 2014). Concretizar um conceito teórico consiste em fornecer um método ou procedimentos para representar em elementos observáveis (Kanakoudis *et al.*, 2016; Anandhi e Kannan, 2018; Souza *et al.*, 2021). Em geral, vulnerabilidade é o grau em que um sistema é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças ambientais. Muitos métodos e abordagens diferentes foram desenvolvidos e aplicados para avaliar quantitativamente a vulnerabilidade em diferentes escalas ao redor do mundo (Adger *et al.*, 2004; Gbetibouo *et al.*, 2010; Zurovec *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Delpla *et al.*, 2020).

O clima global está mudando e os eventos climáticos extremos decorrentes estão se tornando constantes, a

adaptação ou criação de índices e outros mecanismos para o monitoramento e possível previsão desses eventos tornam-se fundamentais. Deste ponto, a escassez hídrica no nordeste brasileiro é estudada sob diversas óticas (De Carvalho, 2012; Silva, 2014; Marengo *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2018). A respeito da escassez hídrica vários índices foram desenvolvidos, como o Índice de Gravidade de Seca de Palmer (Palmer, 1965; Karl, 1986), para caracterização da seca meteorológica; o índice padronizado de precipitação (SPI) McKee *et al.* (1993), visando avaliar as condições de seca para várias escalas de tempo; Vicente-Serrano *et al.* (2010) propuseram o índice padronizado de evapotranspiração e precipitação (SPEI), cada vez mais utilizado no mundo, especialmente em regiões áridas.

Em síntese, o ciclo da água está diretamente ligado ao clima. Assim, mudanças no clima que alterem o regime de chuvas podem provocar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca. Esses eventos afetam a oferta de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para todos (ANA, 2020).

Dada a necessidade de mais informações para auxiliar na gestão do risco de seca e no planejamento do uso da água no semiárido brasileiro, este trabalho segue duas linhas: (I) Analisar a variabilidade espaço-temporal das componentes hidroclimáticas da Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco; (II) Criar um Índice de Vulnerabilidade Hídrica a partir da análise fatorial das componentes hidroclimáticas.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O objeto de estudo é a Bacia Hidrográfica do Submédio do Rio São Francisco (BHRSF), que abrange 59,4% de Pernambuco, 39,5% da Bahia e 1,1% de Alagoas. De acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica do São Francisco (CBHSF, 2020) a região do Submédio São Francisco é a segunda maior da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF), com 110.446,00 km², ou 17% da área da BHRSF. Estende-se da cidade de Remanso, constituindo-se na divisa natural entre os estados da Bahia e de Pernambuco, onde o rio inflexiona o seu curso para o leste, até alcançar o limite com Alagoas, compreendendo 440 km de extensão (Fig. 1).

O clima é BSh segundo classificação Köppen, caracterizado como semiárido quente, com temperatura média anual em torno dos 26 °C. Os meses mais quentes são outubro e novembro e os mais frios junho e julho. A vegetação de caatinga é predominante em quase toda a área do Submédio São Francisco. Topograficamente, a região de estudo se caracteriza por apresentar relevo plano a ondu-

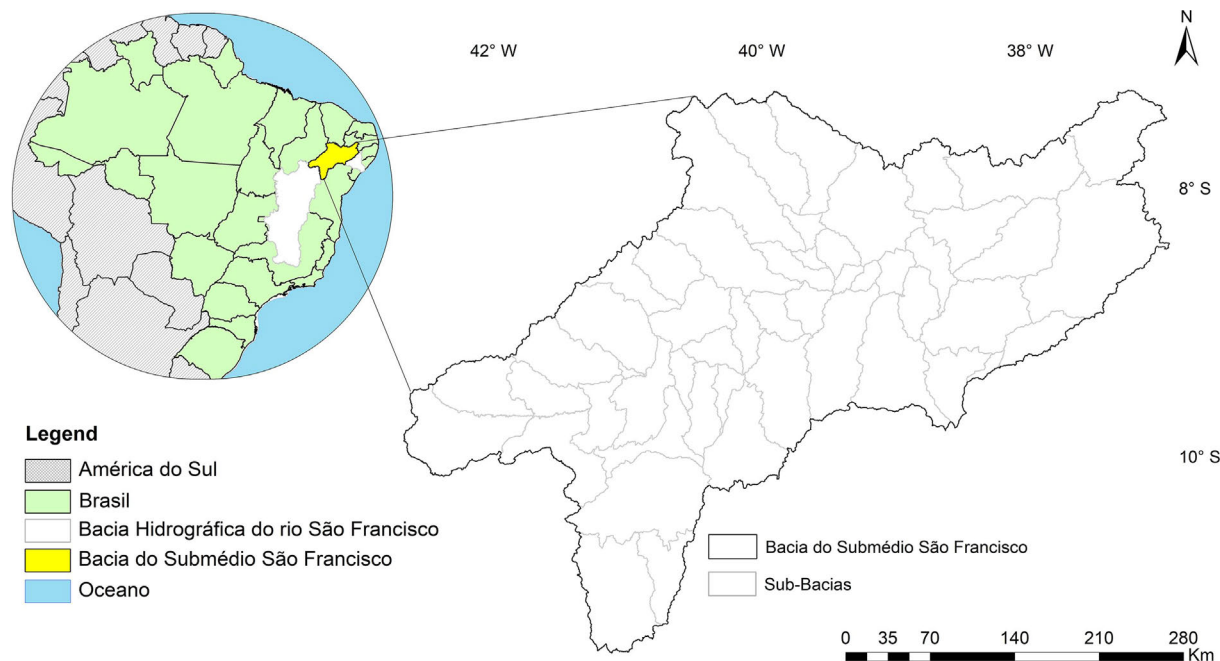


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco.

lado com vales muito abertos; segundo o MMA (2006) no submédio predominam solos com aptidão para a agricultura irrigada: latossolos e argilossolo vermelho e alissolo crômico.

2.2. Banco de dados e o modelo SWAT

Os dados utilizados nesta pesquisa são oriundos de saída do modelo hidrológico SWAT, disponibilizados por Silva (2014) para a bacia do Submédio São Francisco. O trabalho de Silva (2014) objetivou calibrar e validar o modelo SWAT para a simulação do escoamento superficial e aporte de sedimentos na BHSRSF. O resultado das simulações para diferentes usos do solo possibilitou a identificação de áreas que apresentam o maior potencial a erosão hídrica, pedológica e associada ao relevo, como também toda a interação da interface do sistema solo-planta-atmosfera (Silva, 2014).

Foram utilizados os dados de: Precipitação (PRP), Evapotranspiração potencial (ETP), Evapotranspiração real (ET), Umidade do solo (SW), Percolação (PERC), Escoamento Superficial (SURQ), Recarga de Aquífero (GW) e Produção de água (WYLD), para o período de 1993 à 2010, expressos em mm. Para a extração dessas variáveis são necessários diversos dados de entrada no modelo SWAT, são estes: Modelo Digital de Elevação (MDE); Características físico-químicas do solo (Soil-Map); Uso e Cobertura da Terra (LULC); Características Climáticas da bacia (temperaturas, precipitação, velocidade do vento, humidade relativa e radiação global).

2.2.1. O modelo SWAT

O modelo SWAT foi concebido para simular fisicamente os processos de fluxo de água no rio, escoamento de água na superfície, percolação e infiltração, recarga de aquíferos rasos e profundos bem como o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (Arnold *et al.*, 1998; de Oliveira Serrão *et al.*, 2021). É um modelo de larga-escala que divide a bacia hidrográfica em sub-bacias conectadas por uma rede de drenagem (Oliveira *et al.*, 2018; de Oliveira Serrão *et al.*, 2020). Cada sub-bacia é ainda delineada em unidades de resposta hidrológica (HRU) que consistem em uma combinação única de cobertura da terra, declive e tipo de solo (Arnold *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2018). o ciclo hidrológico no modelo SWAT é baseado na Eq. (1), que também é a equação principal do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

em que SW_T é o conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 é o conteúdo de água no solo disponível para as plantas (mm); P é a precipitação pluvial (mm); Q_{sup} é o escoamento superficial (mm); ET é a evapotranspiração (mm); W_a é a percolação (mm) e; Q_{sub} é o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

Após a simulação, é necessário a análise de sensibilidade do modelo para identificar quais parâmetros melhor representam os processos hidrológicos da região e assim, ranquear quais parâmetros devem ser calibrados. A calibração é realizada utilizando ferramentas que permite ao

modelador editar o desempenho global dos parâmetros de entrada do modelo. Neste estudo a calibração foi efetuada por meio da rotina de autocalibração existente no próprio modelo. A autocalibração do SWAT é um processo iterativo em que o modelador, escolhe os principais parâmetros calibráveis da bacia. E através do método Latin Hipercube simulations (LH), o modelo altera os valores de um determinado parâmetro, dentro de um range pré-estabelecido pelo modelador, e este(s) parâmetros são testados em diferentes simulações até que não haja nenhuma melhoria entre a variáveis simulada e os dados observados. (Silva *et al.*, 2018). Por fim, o modelo foi validado através dos indicadores estatísticos de desempenho como índice de Nash e Sutcliffe, índice de concordância de Willmott, Correlação de Pearson e outros. Para mais detalhes sobre a modelagem SWAT na BHSRSF e os dados de saída do modelo, observe Silva *et al.* (2018).

2.3. Análise fatorial

A análise fatorial (AF) é um método que busca a identificação de fontes subjacentes de variação comum a múltiplas variáveis, de forma a reduzi-las a um subconjunto de fatores representativos das variáveis originais (Lattin *et al.*, 2011). Tal técnica possibilitou identificar as dimensões isoladas da estrutura dos dados para então determinar o grau em que cada variável é explicada por cada fator (Manly, 2008). A composição do modelo AF foi calculada com base na Eq. (2).

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (2)$$

em que X_i é a variável analisada padronizada (média zero e desvio padrão 1); a_i é uma constante (carga fatorial); F é o Fator (com média zero e desvio padrão 1) comum a todas as variáveis e ε_i é o erro (que é específico de cada variável).

De acordo com Härdle e Simar (2007), a correlação é uma medida mais adequada para avaliar o grau de relacionamento linear entre variáveis estatísticas. As correlações entre os pares de variáveis podem ser organizadas em uma matriz de correlações (Matos e Rodrigues, 2019). O triângulo inferior da matriz exibe as correlações simples entre todos os pares possíveis de variáveis. Os elementos da diagonal, que são todos igual a 1, em geral são omitidos. O cálculo da matriz de correlação é feito através do coeficiente de Spearman Eq. (3).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{(n^3 - n)} \quad (3)$$

em que d_i é a diferença entre cada posição de x e y .

O critério de Kaiser-Meyer-Olkin - KMO é outra forma para identificar se o modelo de análise fatorial que está sendo utilizado está adequadamente ajustado aos dados, isto se dá testando a consistência geral dos dados

(Cruz e Topa, 2009). O grau das correlações simples com as correlações parciais foi estimado utilizando-se a estatística proposta pelo teste Kaiser Meyer Oklin (KMO) de acordo com a Eq. (4).

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (4)$$

em que r_{ij}^2 , para todo $i \neq j$, é o coeficiente de correlação original entre variáveis e a_{ij}^2 é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

Com intuito de redistribuir a variância dos primeiros fatores para os demais e atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo foi utilizado a técnica de rotação dos fatores a partir do método Varimax normalizada (Hair *et al.*, 2009). A rotação Varimax, distribui as cargas dos Fatores de forma que sua dispersão é maximizada através da minimização do número de coeficientes grandes e pequenos (Singh *et al.*, 2004). Logo, quanto maior o valor absoluto da carga fatorial, mais importante é a carga na interpretação (rotulação) do Fator (Hair *et al.*, 2005 Azevedo *et al.*, 2019).

2.3.1. Índice de vulnerabilidade hídrica

O Escore Fatorial é uma medida composta criada para cada variável observável, sobre cada fator extraído na análise fatorial (Cruz e Topa, 2009). Para a construção do Índice de Vulnerabilidade Hídrica (IVH) foi realizada a combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem as principais características hidroclimáticas da área de estudo a partir da Eq. (5). Por isso, os escores fatoriais são padronizados para que tenham média zero e desvio padrão 1 (Velicer e Jackson, 1990).

$$F_{ij} = b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_p x_{ip} \quad (5)$$

em que F_{ij} é a variável dependente não observável, e pode ser estimada por intermédio da técnica de análise fatorial fazendo uso da matriz do vetor X de variáveis observáveis. Ou seja, é o escore gerado pela adesão dos elementos com a nova variável.

A matriz F_{ij} de regressão a ser estimada a partir dos n escores fatoriais pode ser prejudicada devido à magnitude e/ou devido às unidades de medida das variáveis dependentes x . Neste caso, torna-se necessário substituir a matriz original $x_{i,s}$ pela matriz de variáveis padronizadas W_{ij} e estimados seguindo a Eq. (6).

$$W_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})}{s} \quad (6)$$

em que x_i é o valor observado; \bar{x} é o valor médio e s é o desvio padrão das observações.

Assim, o IVH foi obtido de acordo com a Eq. (7).

$$IVH = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^q \lambda_j} \times FP_{ij} \right), \quad 0 \leq IVH \leq 1 \quad (7)$$

em que l_i representa a variância explicada por cada fator; $\sum_{j=1}^q \lambda_j$ é a soma total da variância explicada pelo conjunto de fatores comuns e FP_{ij} é o escore padronizado para se obter os valores positivos dos escores originais essenciais para hierarquizar as observações.

Objetivando classificar a incidência da vulnerabilidade hídrica na BHSRSF a partir do resultado do IVH foi utilizado técnica estatística dos percentis que divide o número de observações por ordem crescente de frequência, como pode ser observado na Tabela 1.

2.4. Análise de agrupamento

A análise de agrupamento foi utilizada para agrupar as sub-bacias que obtiveram características semelhança quanto a distribuição dos valores de IVH. Foi empregado o método de K-means da Cluster Analysis, o qual possui um parâmetro de entrada, k , que corresponde à quantidade de grupos a serem identificados pelo algoritmo. O K-means é baseado na distância euclidiana, tendo como critério de agregação o centroide (Jinyin *et al.*, 2017). Este

Tabela 1 - Classificação do Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH.

| Vulnerabilidade | Intervalo | Percentil |
|-----------------|-----------|-----------|
| Inexistente | 0,40-0,69 | 100% |
| Baixo | 0,34-0,40 | 75% |
| Médio | 0,28-0,34 | 50% |
| Moderado | 0,20-0,28 | 25% |
| Alto | 0,18-0,20 | 10% |
| Extremo | 0-0,18 | 5% |

método é o não-hierárquico que consiste em um procedimento onde, dado um número de clusters previamente determinado, calcula pontos que representam os “centros” destes clusters e que são espalhados homogeneamente no conjunto de respostas obtidas heurísticamente, até alcançar um equilíbrio estático (Hair *et al.*, 2005). O critério de agrupamento K-means é descrito pela Eq. (8).

$$E = \sum_{k=1}^k \sum_{x_i \in C_k} d(x_i, x_{0k}) \quad (8)$$

em que x_{0k} é o centroide do cluster C_k e $d(x_i, x_{0k})$ é a distância entre os pontos x_i, x_{0k} . O centroide pode ser a média ou a mediana de um grupo de pontos. As etapas do processo metodológico são descritas na Fig. 2.

3. Resultados e Discussão

3.1. Variabilidade espacial dos componentes hidrológicos

A distribuição espacial das variáveis hidrológicas descritas é visualizada nas Figs. 3 e 4 em que o escoamento superficial médio (3A) na área de estudo é de 23,8 mm e máximo de 93,3 mm, tais valores podem estar associados a distribuição irregular das chuvas na região, visto que o SURQ se dá principalmente após a precipitação. Segundo McDonnell (2013); Bachmair; Weiler (2011) e Silva *et al.* (2018) o escoamento superficial pode ser gerado pelo excesso de infiltração, quando a precipitação supera a taxa de infiltração ou quando a capacidade de armazenamento do solo é excedida.

A umidade do solo (Fig. 3B) apresenta valores a partir de 50 mm, em decorrência do latossolo presente na área, o qual proporciona alta condutividade hidráulica, permitindo o armazenamento de água, mesmo em sub-bacias com baixa pluviosidade. Ao avaliar as característi-

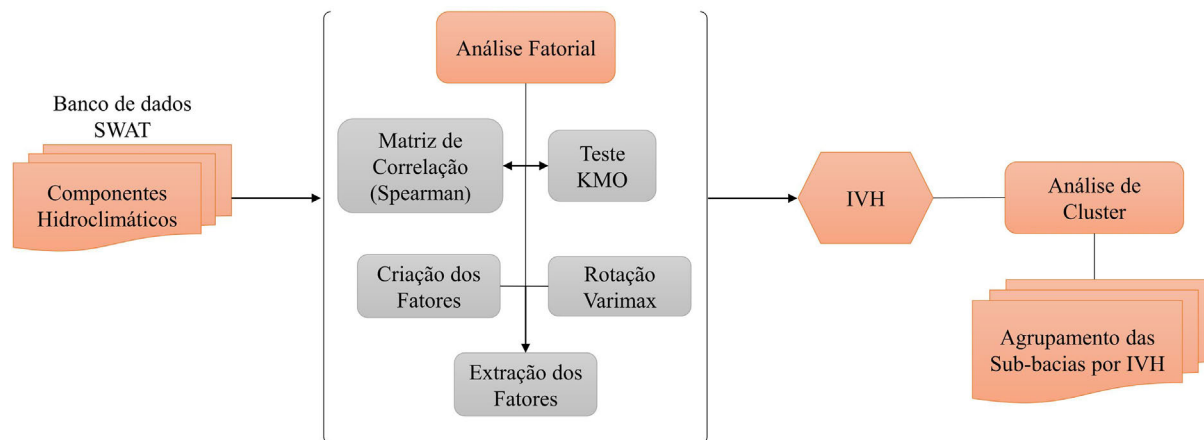


Figura 2 - Diagrama das etapas percorridas entre o modelo SWAT e o IVH.

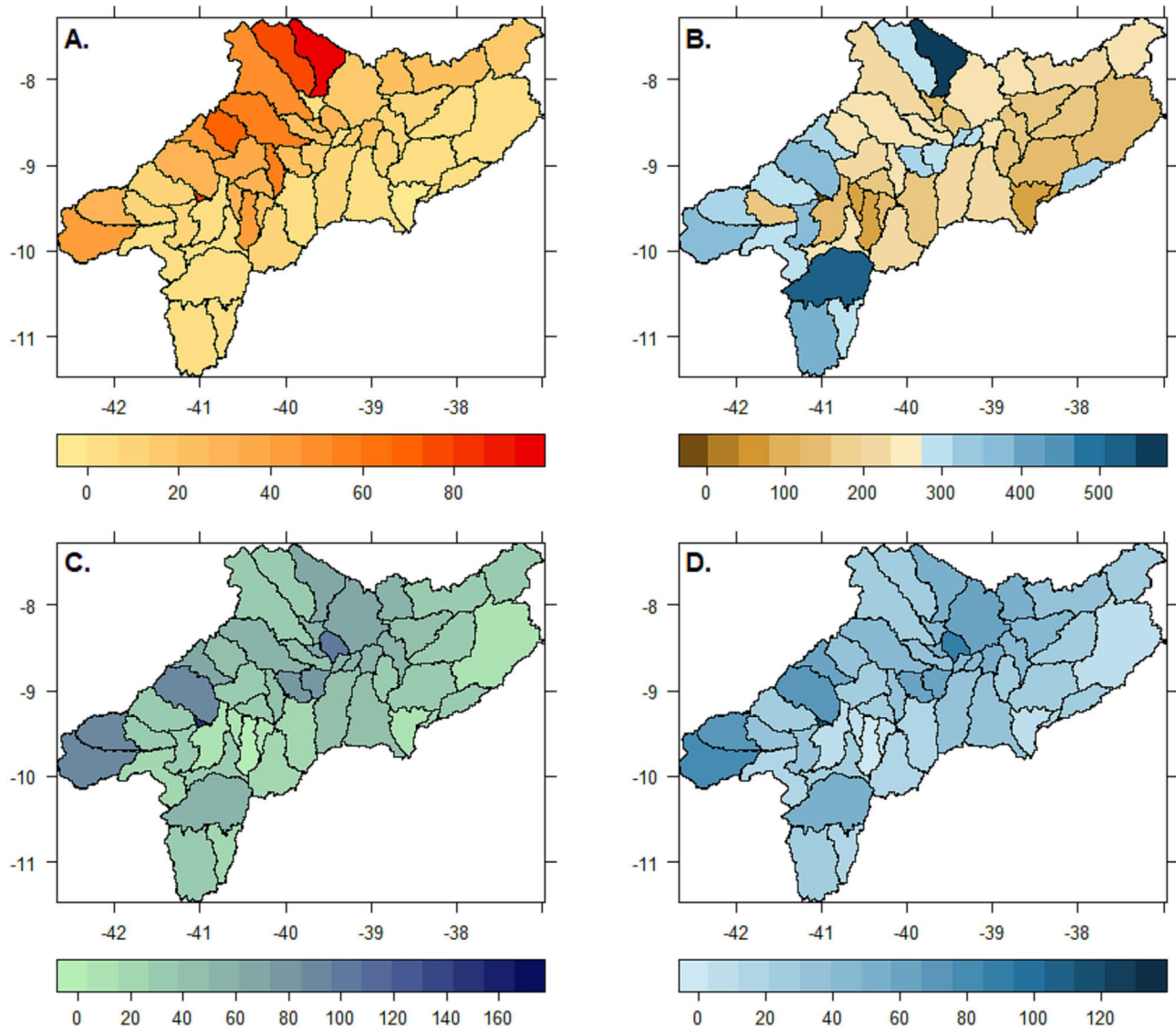


Figura 3 - Distribuição espacial média do (A) escoamento superficial, (B) umidade do solo, (C) percolação, (D) recarga do aquífero no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.

cas de umidade do solo em Pernambuco, [Dos Santos et al. \(2011\)](#) constataram que a umidade do solo sob cobertura natural aumenta até o segundo dia após a precipitação e, a partir daí, começa a decair. De acordo com nossos resultados o valor máximo foi 547,3 mm, o qual deve estar relacionado ao período chuvoso na região. A relação entre a taxa de infiltração, permeabilidade e intensidade da precipitação determina a quantidade de água percolada. As variáveis percolação ([Fig. 3C](#)) e aquífero profundo ([Fig. 3D](#)) demonstram comportamentos análogos, (valor médio: 47 mm e 39 mm, respectivamente) pois a percolação é o avanço descendente da água na zona não saturada e cerca de 83% da água que percola se torna água subterrânea cumprindo uma fase do ciclo hidrológico.

Segundo [Carvalho et al. \(2020\)](#) e [de Oliveira Serrão et al., \(2020\)](#) a precipitação e a evapotranspiração são

componentes importantes do balanço hídrico climatológico e correspondem ao incremento e as perdas de água, respectivamente, numa superfície cultivada.

A distribuição espacial da precipitação ([Fig. 4A](#)) e evapotranspiração real ([Fig. 4D](#)) apresentam características semelhantes, com valores mínimos de 216,2 mm e 207,7 mm respectivamente. A precipitação não é homogênea espacialmente, e é entrada de água na bacia hidrográfica tomando-a como um sistema físico, quanto maior a precipitação, maior será a capacidade do sistema de realizar os processos de difusão turbulenta e molecular. Conforme [Camargo e Camargo \(2000\)](#) a ETP é processo oposto à precipitação, pois representa a água que retorna forçosamente para a atmosfera, em estado gasoso, e depende da energia solar disponível na superfície do terreno para vaporizá-la, enquanto que a precipitação é o

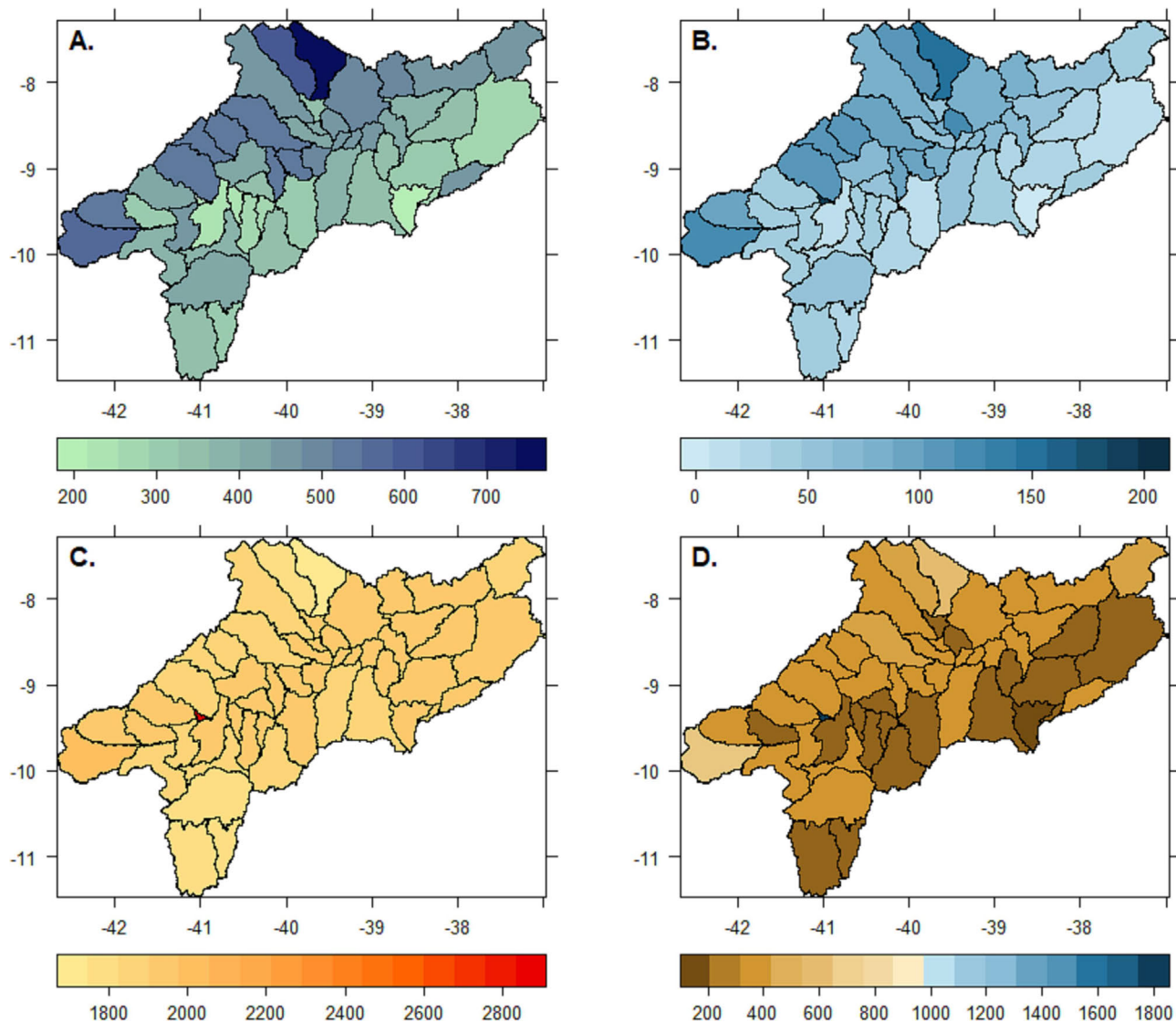


Figura 4 - Distribuição espacial da (A) precipitação, (B) produção de água, (C) evapotranspiração potencial, (D) evapotranspiração real no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.

agrupamento de partículas menores da água que evaporou, e à medida que elas aumentam de tamanho ficam mais pesadas, deixam de flutuar e caem, retornando à superfície em forma de chuva. Essa afirmativa pode ser vista ao comparar a Fig. 4C (valor máximo: 2.835 mm) com a Fig. 4A (valor máximo: 734 mm), em que há grande disparidade entre as variáveis. *Carvalho et al. (2020)* também observou essa relação inversa entre a precipitação e a evapotranspiração de referência estimada por Thornthwaite para municípios do Piauí.

A produção de água (Fig. 4B) é a variável hidrológica de menor magnitude no BHSRSF, seu valor máximo é de 197,6 mm. Isto ocorre, pois, a irregularidade de chuvas afeta o escoamento, percolação e fluxo de base, consequentemente a produção de água (*Silva et al., 2018; de Oliveira Serrão et al., 2020*). *Brown et al. (2005)* cons-

taram que as mudanças na produção de água também podem ser atribuídas a mudanças na vegetação e ao aumento da evapotranspiração.

3.2 Análise fatorial

Inicialmente obtém-se o resultado do coeficiente de correlação de Spearman (ρ), apresentados na Fig. 5, que avalia a relação monotônica entre duas variáveis, ou seja, que tendem a mudar juntas, mas não necessariamente a uma taxa constante.

A maior correlação positiva existente está entre percolação e a recarga do aquífero profundo reafirmando a interdependência entre essas variáveis. A produção de água (WYLD) também está altamente relacionada com a PERC ($\rho = 0,85$) e GW ($\rho = 0,84$), uma vez que a água que

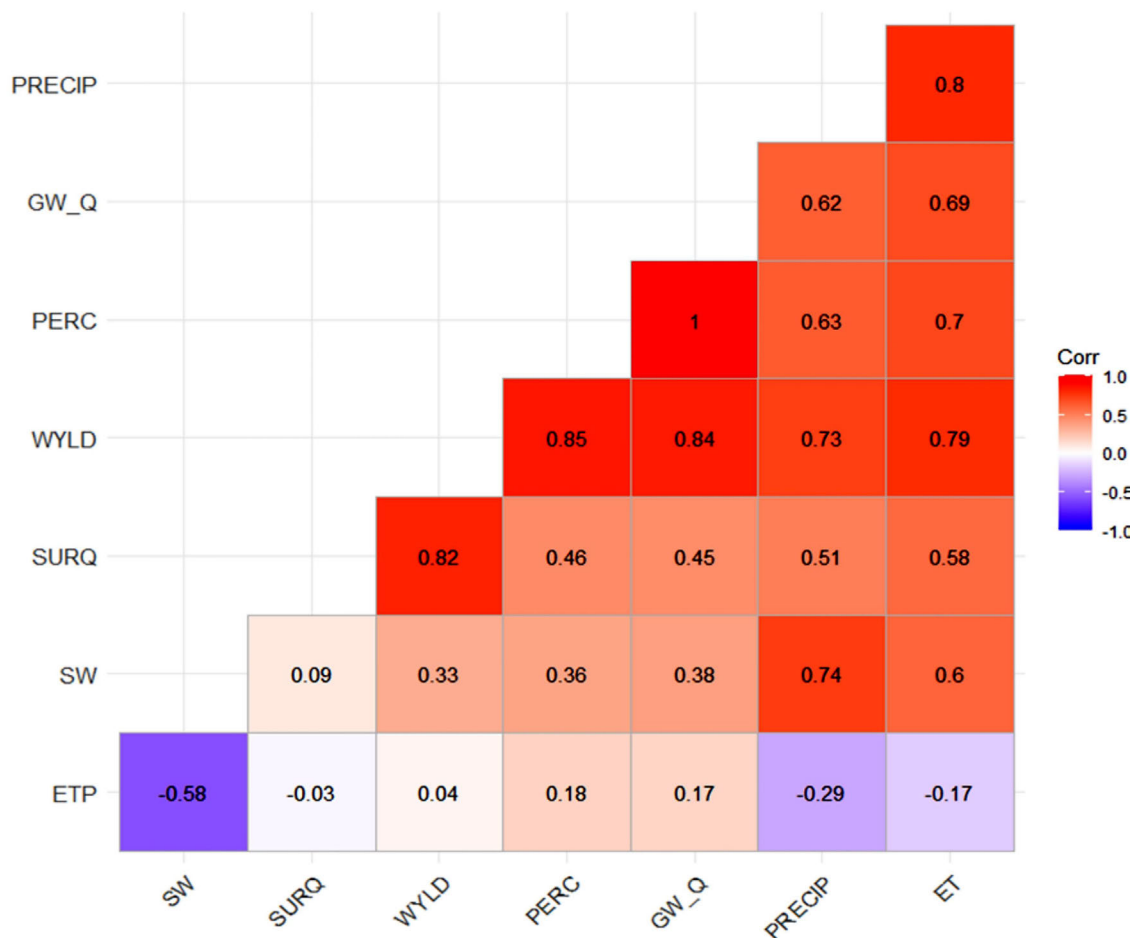


Figura 5 - Correlograma entre as variáveis hidrológicas no Submédio São Francisco.

Tabela 2 - Teste de Kaiser Meyer Olkin - KMO.

| | |
|--------|------|
| PRECIP | 0,70 |
| ETP | 0,52 |
| ET | 0,89 |
| SW | 0,50 |
| PERC | 0,63 |
| SURQ | 0,55 |
| GW | 0,62 |
| KMO | 0,64 |

infiltra e percola contribuem para produção de água. A correlação entre SW com PRECIP ($\rho = 0,74$) também foi satisfatória, apontando que a quantidade de água no solo está intimamente ligada à precipitação, visto que quanto mais chuva, maior a umidade do solo.

À medida que aumentam as perdas evaporativas, diminui a quantidade de água do solo (Zou *et al.*, 2014; Deng *et al.*, 2016), isso é observado na correlação negativa entre SW e ETP ($\rho = -0,58$). Por consequência, diminui a recarga das reservas subterrâneas (Oliveira *et al.*, 2016)

confirmado na baixa relação entre SW e GW ($\rho = 0,38$). Tratando-se da ETP, esta não apresenta compatibilidade com as variáveis SURQ e WYLD. Isso ocorre pois o SURQ se dá principalmente durante eventos de precipitação, enquanto a ETP está condicionada a dias de céu claro (Collischonn e Tucci, 2014; Silva *et al.*, 2018).

As variáveis descritas acima foram submetidas ao teste de Kaiser Meyer Olkin - KMO (Tabela 2). A estatística do teste indicou um valor na ordem de 0,64, destacando a existência de correlações parciais entre pares de variáveis.

Observa-se que a variável WYLD (Produção de Água) foi removida do conjunto de observações por não apresentar valores consideráveis. Apurada a adequação da base de dados, e tomados os indicadores que são passíveis da aplicação da AF, foi possível extrair os fatores que irão compor a capacidade de explicação da variância total do conjunto de dados através do Scree plot, gráfico utilizado para selecionar o número de fatores a usar com base no tamanho dos autovalores (Fig. 6).

A distribuição do Scree plot descreve graficamente um “ponto de salto”, de acordo com Catell (1978), tal

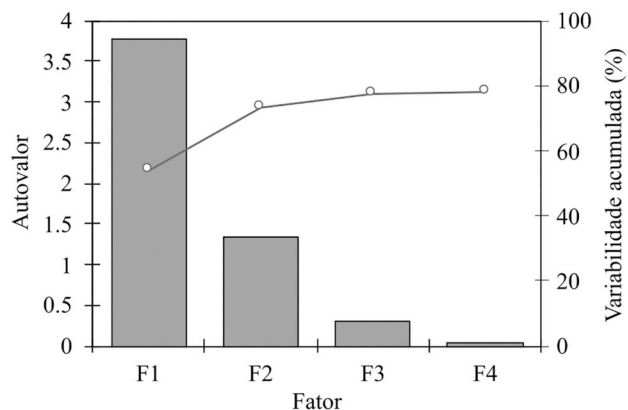


Figura 6 - Scree plot: Curva da variância individual de cada fator.

comportamento indica que muita variância foi perdida e, por isso, deve-se parar de extrair fatores.

Foi utilizado o critério de Normalização de Kaiser para definir o número de fatores que representará o conjunto de variáveis latente. Foram determinados e extraídos os fatores F1 e F2, os quais apresentaram maior autovalores e maior percentual de variabilidade acumulada, 54% e 19,3%, respectivamente, totalizando uma capacidade de explicação de 73,3% da variância total existente entre estas variáveis consideradas.

Os autovalores obtidos na AF foram submetidos à rotação Varimax com o objetivo de detectar quais variáveis representam melhor os fatores e, com isso, facilitar a interpretação dos resultados. Após a rotação, os fatores F1 e F2 passaram a explicar 48,4% e 24,9% da variabilidade, respectivamente. Cada fator representa um conjunto de variáveis hidroclimáticas que respondem as características de solo e condições climáticas da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco (Fig. 7).

Os fatores expressam o que existe de comum nas variáveis originais (Reis, 1997). O Fator 1 (F1) possui maior poder de explicação para as variáveis: ET real

(85%), Percolação (98%), Escoamento Superficial (52%) e Recarga do Aquífero Profundo (97%), admitindo assim que este representa as componentes hidroclimáticas de solo, pois constitui elementos do ciclo hidrológico que ocorrem predominantemente na superfície.

Por outro lado, o Fator 2 (F2) apresenta maior explicabilidade para as variáveis: Precipitação (64%), ET potencial (83%) e Umidade no Solo (97%), assume-se que o F2 constitui componentes climáticas, neste caso é aplicável o conceito de potencial hídrico, ou seja, o fluxo de água dos pontos de maior para menor potencial (Brown *et al.* 2005; Silva *et al.*, 2018; Carvalho *et al.* 2020; de Oliveira Serrão *et al.*, 2021).

3.3. Índice de vulnerabilidade hídrica

Neste estudo, as coordenadas (carga fatorial) representam a força de relação entre a sub-bacia à cada fator. Ou seja, variáveis que têm coordenadas altas no mesmo eixo devem estar medindo aspectos de uma mesma dimensão comum subjacente (fator) (Field, 2009). A partir da matriz fatorial (correlação da variável com o fator) foi elaborado a Fig. 7, mostrando a distribuição das sub-bacias e sua respectiva relação com as componentes hidroclimáticas do Fator 1 (solo) ou do Fator 2 (clima) e a distribuição espacial do IVH. De acordo com a Fig. 8A observa-se que a bacia apresenta valores entre 0,0 à 0,2 que estão associados ao fator solo, o qual predomina na área. Entretanto, na Fig. 8B o intervalo é maior, de 0,1 à 0,45 apontando que o fator clima explica certas características da área de estudo que o Fator 1 não é capaz de esclarecer, como é exemplificado por Marengo *et al.* (2017) citando que alta pressão subtropical do Atlântico tem um papel ativo, isso determina a subsidência de baixo nível que causa efeito negativo no regime das chuvas NEB.

A Fig. 8C demonstra como ocorre a contribuição dos fatores para a formação do IVH, o somatório destes permite identificar, em destaque azul, as áreas que possuem o

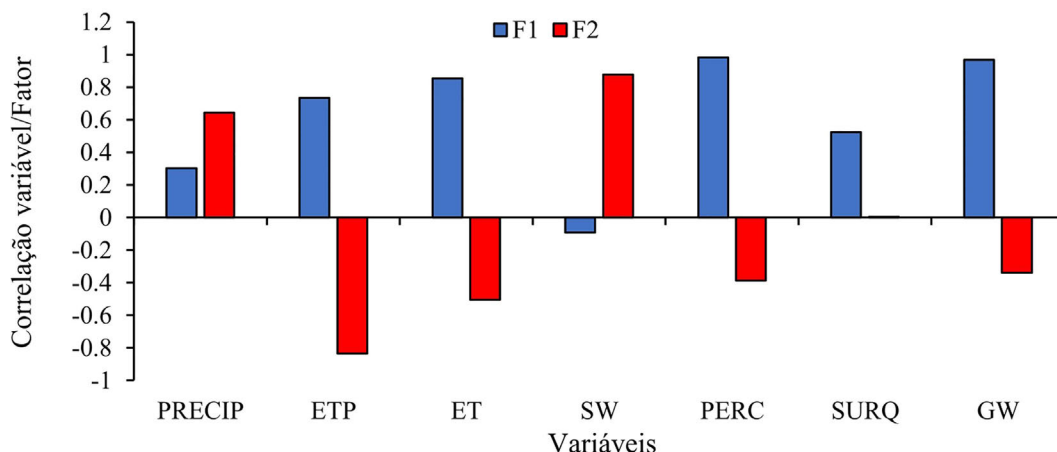


Figura 7 - Aderência das variáveis aos fatores e suas variabilidades de explicação.

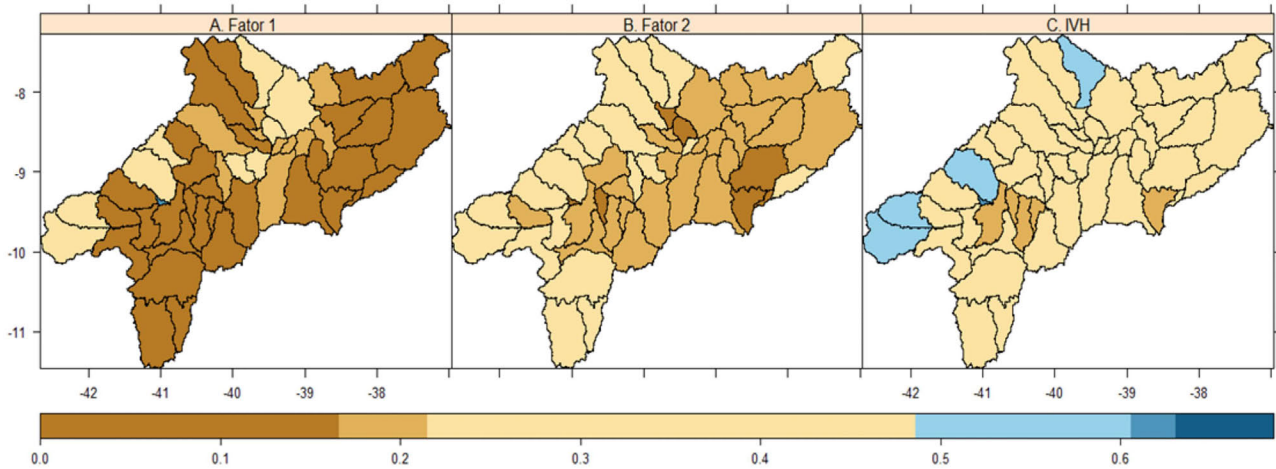


Figura 8 - Distribuição espacial do Fator 1 (A), Fator 2 (B) e do Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH (C) na BHSRSF.

maior índice, ou seja, aquelas que são menos vulneráveis e ainda resistem aos efeitos das mudanças climáticas.

Com base na Fig. 9 é possível observar a distribuição espacial dos grupos e seus respectivos IVH. O G1 obteve IVH igual à 0,34 e o G2 obteve IVH igual à 0,40, ambos são classificados como baixo. As características das sub-bacias pertencentes à esses grupos são retratadas pelo

Fator 2 (clima), em que as variáveis ETP, PRECIP e SW apresentaram valores elevados, destacando as condições atmosféricas existentes na bacia: Com a precipitação ocorre o aumento da umidade de solo e consequentemente, maior potencial evaporativo. Informações sobre disponibilidade hídrica servem de apoio à decisão sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos na bacia hidrográ-

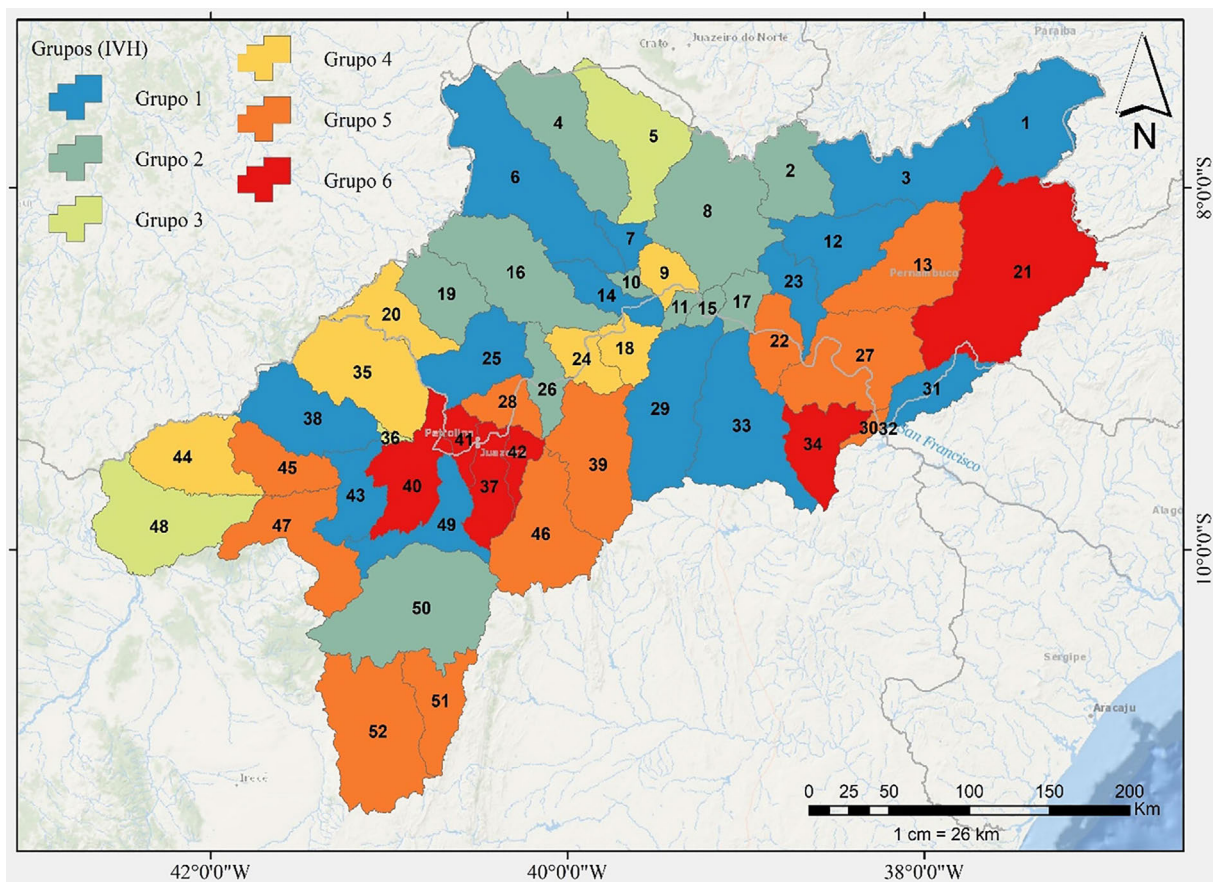


Figura 9 - Distribuição espacial de grupos homogêneos do Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH para a BHSRSF.

fica. É preciso implementar uma infraestrutura para a sustentabilidade hídrica da região, visto que a perda de regularidade hidrológica fragilizará ainda mais o equilíbrio entre oferta e demanda. De forma simplificada, pode-se dizer que um espaço territorial é sustentável se ele for capaz de manter um equilíbrio dinâmico entre a ‘oferta’ e a ‘demanda’ por recursos naturais (Mariotoni e Demanboro, 2000).

O G4 (IVH = 0,48) e o G3 (IVH = 0,60), foram classificados como índice de vulnerabilidade inexistente. Contudo, estes grupos abrangem um número pequeno de sub-bacias, inferindo que somente uma pequena área da BHSRSF não é vulnerável. Implementar soluções pontuais que postergam medidas estruturais, como a revitalização dos mananciais, medidas eficientes para captação de água da chuva, o reuso e a despoluição de rios são aspectos essenciais para garantir um bom manejo de bacias hidrográficas e proteção dos recursos hídricos. Segundo a CO-DEVASF (2003) o desenvolvimento sustentável da região, será obtido com ações de diversas naturezas que ofereça água em qualidade e quantidade necessárias e suficientes para o desenvolvimento das demais ações relacionadas com o aproveitamento dos recursos de água e solo, e atividades produtivas decorrentes, como o aproveitamento hidro agrícola e abastecimento de água. O G6 constitui o índice de vulnerabilidade extremo, formado por seis áreas (21, 34, 37, 40, 41 e 42) e o G5 traduz o IVH alto, composto por onze sub-bacias (13, 22, 27, 28, 30, 39, 45, 46, 47, 51 e 52) cuja, estes, estão predominantemente inseridas no Fator 1 e apresentaram menores valores de precipitação, 325 mm e 259 mm, nesta ordem.

Na perspectiva das alterações climáticas, isso indica que com a instabilidade no regime de chuvas deverá ocorrer menor recarga dos aquíferos, impedindo que, na época da estiagem, os reservatórios continuem a manter sua produção para o abastecimento, podendo ainda, apresentar riscos como aumento da temperatura e alterações no regime hídrico. Observa-se também que a grande variabilidade temporal no regime de chuvas, ocasiona em alguns anos secas prolongadas ou precipitação excessiva, as quais causam sérios problemas à agricultura, base econômica da maior parte da região (Lima, 2019). Torna-se imprescindível um sistema de gestão eficiente, eliminando o índice elevado de vulnerabilidade hídrica e evoluindo para um estágio de maior segurança hídrica com controle social.

Além dos já citados, outros problemas que ocasionam esta situação são as alterações no uso e ocupação do solo, somado a má gestão das áreas de recarga hídrica. Silva *et al.* (2018) e de Oliveira Serrão (2020) mencionam que, dentre os fatores que tornam o ambiente vulnerável, o desflorestamento e o mau uso dos ecossistemas alteram o clima regional e em áreas de ecossistemas frágeis e vulneráveis, como o semiárido brasileiro, as mudanças climáticas mais drásticas poderão ocorrer através da soma das ações produzidas pelos gases de efeito estufa (GEE) com o

mau uso e desflorestamento dos ecossistemas locais. Essas alterações no clima da região poderão resultar no impacto sobre a vegetação, a biodiversidade e sobre as atividades que dependem dos recursos naturais (Marengo, 2008).

4. Conclusão

Ao avaliar as características hidroclimáticas da BHSRSF para o período estudado, percebeu-se que a irregularidade do regime pluviométrico, associado a elevada disponibilidade de radiação solar contribui para o aumento da evapotranspiração, tanto em superfícies livres de água como no solo, isto representa uma perda significativa na disponibilidade hídrica da região.

Com o auxílio da Análise Fatorial foi desenvolvido o IVH, o qual possibilitou a classificação de áreas mais ou menos vulneráveis. Dentre as 52 sub-bacias analisadas, 42 apresentaram algum tipo de vulnerabilidade hídrica, com isso, a região do submédio São Francisco está sujeita ao aumento das restrições de água doce e à riscos relacionados com o aquecimento, seca, variabilidade da precipitação e eventos climáticos extremos, principalmente para as populações mais pobres em ambientes urbanos e rurais.

A escassez hídrica tende a afetar a qualidade de vida da população, e interfere diretamente na produção de alimentos. Logo, entende-se que a análise fatorial é uma poderosa ferramenta estatística, quando aplicada na identificação e gestão eficiente dos recursos hídricos do Nordeste.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida à primeira autora e pelo financiamento do Projeto de Pesquisa intitulado “Análise e Previsão dos Fenômenos Hidrometeorológicos Intensos do Leste do Nordeste Brasileiro” - Edital Pró-Alertas nº 24/2014 (Processo nº. 88887.091737/2014-01). Os autores agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento dos Projetos de Pesquisa sob números 446172/2015-4 e 409499/2018-8, como também a Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo nº. 304493/2019-8).

Referências

- ADGER, W.N.; BROOKS, N.; BENTHAM, G.; AGNEW, M.; ERIKSEN, S. Novos Indicadores de Vulnerabilidade e Capacidade Adaptativa. Tyndall Center for Climate Change Research: Norwich, Reino Unido, 2004.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos. Disponível em <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos>, acesso em 17/10/2020.

- ANANDHI, A.; STEINER, J.; BAILEY, N. A system's approach to assess the exposure of agricultural production to climate change and variability. *Climate Change*, v. 136, p. 647-659, 2016. doi
- ANANDHI, A.; KANNAN. Vulnerability assessment of water resources - Translating a theoretical concept to an operational framework using systems thinking approach in a changing climate: Case study in Ogallala Aquifer. *Journal of Hydrology*, v. 557, p. 460-474, 2018. doi
- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. doi
- AZEVEDO, J.V.V.; SOUZA, P.M.; SANTOS, C.A.C.; SILVA, M.T.; SANTOS, D.A.S. Aplicação da análise fatorial para determinação da vulnerabilidade socioeconômica e ambiental nos municípios do Estado da Paraíba. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 10, n. 4, p. 97-111, 2019. doi <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0008>
- BACHMAIR, S.; WEILER, M. New Dimensions of Hillslope Hydrology, in: *Forest Hydrology and Biogeochemistry*. New York: Springer, Cap. 23. p. 455-482, 2011.
- BROWN, A.E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T.A.; WESTERN, A.W.; VERTESSY, R.A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, v. 310, p. 28-61, 2005.
- BROWN, C.M.; JAY R.; XIMING, L.; REED, C.P.M.; ZAGONA, E.A.; OSTFELD, A.; et al. The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. *Water Resources Research*, v. 51, n. 8, p. 6110-6124, 2015. doi
- CAMARGO, A.P. de; CAMARGO, M.B.P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000. doi
- CARVALHO, M.; CORTEZ, C.; SILVA, A.; SILVA, G. Caracterização da precipitação e sua relação com a evapotranspiração de referência em municípios do Piauí. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 24, e14, 2020. doi
- CATTELL, R. B. *The Scientific Use of Factor Analysis in Behavioral and Life Sciences*. Nova York: Plenum, 1978.
- CHEN, Y.; FENG, Y.; ZHANG, F.; WANG, L. Assessing water resources vulnerability by using a Rough Set Cloud Model: A case study of the Huai River basin, China. *Entropy*, v. 21, n. 1, e14, 2019. doi
- COLLISCHONN, B.; TUCCI, C.E.M. Relações regionais entre precipitação e evapotranspiração mensais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 205-214, 2014.
- CORRAR, L.J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J.M. *Análise Multivariada para Cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia*. São Paulo: Atlas, 2007.
- CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. *Elaboração do Estudo de Viabilidade do Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Canal Sertão*. Rio de Janeiro: HYDROS/TECNOSOLO, 2003.
- CRUZ, I.C.; TOPA, M.A. *Análise Multivariada como Ferramenta de Gerenciamento de Fornecedores Visando um Relacionamento com Vantagem Competitiva*. Monografia da Graduação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- DE CARVALHO, O. *As Secas e os Seus Impactos*. In: *A Questão da Água no Nordeste*. Brasília: CGEE/ANA, p. 45-100, 2012.
- DELPLA, I.; PROULX, F.; RODRÍGUEZ, M.J. A methodology to prioritize spatio-temporal monitoring of drinking water quality considering population vulnerability. *Journal of Environmental Management*, v. 255, p. 109869, 2020. doi
- DE OLIVEIRA SERRÃO, E.A.; SILVA, M.T.; FERREIRA, T.R.; SILVA; V.P.R.; SOUSA, F.A.S.; LIMA, A.M.M.; et al. Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of The Total Environment*, v. 744, p. 140981, 2020. doi
- DE OLIVEIRA SERRÃO, E.A.; SILVA, M.T.; FERREIRA, T.R.; ATAIDE, L.C.P.; WANZELER, R.T.S.; SILVA, V.P.R.; et al. Large-scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. *Ecology & Hydrobiology*, v. 21, n. 1, p. 23-35, 2021. doi
- DOURADO, C.S.; OLIVEIRA, S.R. de M.; AVILA, A.M.H. de. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no Estado da Bahia. *Bragantia*, v. 72, n. 2, p. 192-198, 2013. doi
- DOS SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO; A.A.A.; SILVA, D.D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011. doi
- GBETIBOUO, G.A.; RINGLER, C.; HASSAN, R. Vulnerability of the South African farming sector to climate change and variability: An indicator approach. *Natural Resources Forum*, v. 34, p. 175-187, 2010. doi
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. *Análise Multivariada de Dados*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- HAIR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. *Análise Multivariada de Dados*. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HÄRDLE, W.; SIMAR, L. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Berlin: Springer, 2007.
- JINYIN, C.; XIANG, L.; HAIBING, Z.; XINTONG, B. Novel cluster center fast determination clustering algorithm. *Applied Soft Computing*, v. 57, p. 539-555, 2017. doi
- JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.
- JUN, K.S.; CHUNG, E.C.; SUNG, J.Y.; LEE, K.S. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. *Science of The Total Environment*, v. 409, n. 24, p. 5228-5242, 2011. doi
- KANAKOUDIS, V.; TSITSIFLI, S.; GONELAS, K.; PAPADOPOULOU, A.; KOUZIAKIS, C.; SOKRATIS, L. Determining a socially fair drinking water pricing policy: the case of Kozani, Greece. *Procedia Engineering*, v. 162, p. 486-493, 2016. doi

- KARL, T. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 25, p. 77-86, 1986. doi [doi](#)
- LATTIN, J.; CARROLL, J.D.; GREEN, P.E. *Analyzing Multivariate Data*. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- LEWIS, S.L.; EDWARDS, D.P.; GALBRAITH, D. Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, v. 349, n. 6250, p. 827-832, 2015. doi [doi](#)
- LIMA, S.L. de; SILVA, M.T.; SOUSA, W.G. de; SIQUEIRA, M.S.; ANDRADE, A.S. de; MELO, M.M.M.S. Padrões espaciais e temporais de episódios de seca no Estado do Rio Grande do Norte. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 9, p. 330-342, 2019.
- MARENGO, J.A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.
- MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil - Past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, p. 1189-1200, 2017. doi [doi](#)
- MARIOTONI, C.A.; DEMANBORO, A.C. A gestão dos recursos hídricos em mega-cidades: desafios da sustentabilidade econômica-ecológica. In: *Anais do VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. Salvador, 2000.
- MATOS, D.A.S.; RODRIGUES, E.C. *Análise Fatorial*. Brasília: Enap, 74 p. Disponível em <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4790/1/Livro%20An%C3%A1lise%20Fatorial.pdf>, acesso em 2 nov. 2022.
- MCDONNELL, J.J. Are all runoff processes the same? *Hydrological Processes*, v. 27, n. 26, p. 4103-4111, 2013. doi [doi](#)
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. In: *8ª Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim, p. 179-184, 1993.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco*. Brasília: MMA, 2006.
- NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; STICKLER, C.; ALENCAR, A.; AZEVEDO, A.; SWETTE, B.; et al. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, v. 344, p. 1118-1123, 2014. doi [doi](#)
- OLIVEIRA, P.T.; LEITE, M.B.; MATTOS, T.; NEARING, M.A.; SCOTT, R.L.; XAVIER, R.O.; et al. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian Cerrado. *Ecology*, v. 10, e1759, 2016. doi [doi](#)
- OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. Land-use change impacts on the hydrology of the upper Grande river basin, Brazil. *Cerne*, v. 24, n. 4, p. 334-343, 2018. doi [doi](#)
- PALMER, W.C. *Meteorological Drought*. Weather Bureau Research Paper, Vol. 45. Washington DC: US Weather Bureau, p. 1-58, 1965.
- PANDEY, A.; HIMANSHU, S.K.; MISHRA, S.K.; SINGH, V.P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, v. 147, p. 595-620, 2016. doi [doi](#)
- ROLAND, F.; HUSZAR, V.L.M.; FARJALLA, V.F.; ENRICH-PRAST, A.; AMADO, A.M.; OMETTO, J.P.H.B. Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. *Brazilian Journal of Biology*, v. 72, n. 3, p. 709-722, 2012. doi [doi](#)
- SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M.H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B.S.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, e. 17, 2007. doi [doi](#)
- SILVA, M.T. *Mudança no Uso de Solo e no Aporte de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- SILVA, V. de P.R.; SILVA, M.T.; SINGH, V.P.; SOUZA, E.P. de.; BRAGA, C.C.; HOLANDA, R.M.; et al. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*, v. 162, p. 166-17, 2018. doi [doi](#)
- SANTOS, K.S.; SILVA, M.T.; OLIVEIRA, A.B.; SERRÃO, E.A.O. Vulnerabilidade socioeconômica no Estado do Rio Grande do Norte a partir de técnicas multivariadas. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 36049, 2021. doi [doi](#)
- TONMOY, F.N.; EL-ZEIN, A.; HINKEL, J. Assessment of vulnerability to climate change using indicators: a meta-analysis of the literature. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, v. 5, n. 6, p. 775-792, 2014. doi [doi](#)
- VELICER, W.F.; JACKSON, D.N. Component analysis versus common factor analysis: some issues in selecting an appropriate procedure. *Multivariate Behavioral Research*, v. 25, n. 1, p. 1-28, 1990. doi [doi](#)
- VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERIA, S.; LOPEZ-MORENO, J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010. doi [doi](#)
- ZUROVEC, O.; CADRO, S.; SITAULA, B.K. Quantitative assessment of vulnerability to climate change in rural municipalities of Bosnia and Herzegovina. *Sustainability*, v. 9, n. 7, p. 1208, 2017. doi [doi](#)