

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ÍNDICES DE VULNERABILIDADE HÍDRICA GEORREFERENCIADOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Renan Rodrigues Campos da Silva ¹

Jussara Ferreira-Santos ¹

* Celso Bandeira de Melo Ribeiro ¹

GEOREFERENCED WATER VULNERABILITY INDEXES: A SYSTEMATIC REVIEW

Recibido el 13 de marzo de 2024. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

The water resource is indispensable, used in almost all productive sectors, and linked to the metabolic maintenance of all living beings. However, due to climate change and population growth, the demand for this resource has indicated a substantial increase in overexploitation and worsening situations such as drought. Given this, water vulnerability indices emerge as a vanguard in global research, helping to understand the pressures exerted, and encouraging the creation of projects and strategies to overcome this problem. Therefore, it is essential to identify the main factors that actively contribute to this vulnerability typology, and the methodologies applied to quantify them. Given this, the main objective of this systematic review was to select and analyze studies related to georeferenced water vulnerability index systems at the river basin level, identifying the main factors that actively contribute to water vulnerability. The results showed, through the creation of bibliometric maps, a strong correlation between the chosen articles, highlighting keywords such as China, vulnerability, drought, and fuzzy mathematics. Furthermore, the presence of methodologies such as Fuzzy logic and Hierarchical Analysis of Fuzzy Processes (FAHP), and the use of natural and socioeconomic factors to calculate water vulnerability was notable.

Keywords: water resources, hydrographic basin, water vulnerability, geoprocessing, systematic review.

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

* Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora. Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Martelos, Juiz de Fora, Minas Gerais. 36036-330. Brasil. Email: celso.bandeira@ufjf.edu.br

Resumo

O recurso hídrico é indispensável, utilizado em quase todos os setores produtivos e ligado à manutenção metabólica de todos os seres vivos. Porém, devido a fatores como as mudanças climáticas e ao crescimento populacional, a demanda por esse recurso tem indicado um aumento substancial na superexploração bem como no agravamento de situações como as de seca. Diante disso, surgem os índices de vulnerabilidade hídrica como vanguarda na pesquisa global, auxiliando no entendimento das pressões exercidas, fomentando a criação de projetos e estratégias para a contornar essa problemática. Dessa maneira, torna-se essencial a identificação dos principais fatores que contribuem ativamente para essa tipologia de vulnerabilidade, assim como as metodologias aplicadas para a sua quantificação. Diante disso, a presente revisão sistemática teve como objetivo principal a realização da seleção e da análise de estudos relacionados a sistemas de índices de vulnerabilidade hídrica georreferenciados a nível de bacia hidrográfica, identificando os principais fatores que contribuem ativamente com a vulnerabilidade hídrica. Os resultados evidenciaram, através da realização de mapas bibliométricos, uma forte correlação entre os artigos elegidos, destacando palavras-chave como China, vulnerability, drought e fuzzy mathematics. Ainda, foi notório a presença de metodologias como a lógica Fuzzy e a Análise Hierárquica de Processos Fuzzy (FAHP), bem como a utilização de fatores naturais e socioeconômicos para o cálculo da vulnerabilidade hídrica.

Palavras-chave: recursos hídricos, bacia hidrográfica, vulnerabilidade hídrica, geoprocessamento, revisão sistemática.

Introdução

A água é um recurso natural indispensável, sendo utilizada em quase todos os setores produtivos (Li *et al.*, 2017) e estando ligada à manutenção metabólica de todos os seres vivos (Jéquier e Constant, 2010). Entretanto, devido a fatores como o crescimento populacional, a demanda de água aumentará de modo a resultar em uma superexploração dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais (Hoekstra, Buurman e van Ginkel, 2018). Somado a isso, as mudanças climáticas, cada vez mais evidentes, possuem o potencial de agravar situações como as de seca, interrompendo o equilíbrio ecológico e gerando vulnerabilidades socioeconômicas (Satish Kumar *et al.*, 2021).

A seca pode ser definida como uma escassez de água prolongada, devido, principalmente, à precipitação insuficiente (Bullock, Haddow e Coppola, 2018). Entre os perigos naturais, aquele é um dos mais prejudiciais, possuindo um impacto duradouro nos sistemas humanos e naturais (Wu, Ma e Yan, 2020). Ainda assim, cerca de 80% da população mundial está exposta a uma alta ameaça hídrica (Vörösmarty *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2015), onde o estresse hídrico está projetado a atingir cerca de dois terços de todas as bacias hidrográficas do mundo (Alcamo *et al.*, 2007). Dessa forma, a análise da vulnerabilidade hídrica surge da necessidade de entender as pressões exercidas sobre os seus sistemas (Anandhi e Kannan, 2018), auxiliando na criação de projetos e no implemento de estratégias para proteger esses recursos (Chhetri *et al.*, 2020).

Diante disso, os índices de vulnerabilidade surgem como vanguarda da pesquisa global nos recursos hídricos (Alonso *et al.*, 2019) como forma de aprimorar nosso conhecimento sobre a

situação dos recursos hídricos de uma região, contribuindo para a formulação de planos locais de desenvolvimento sustentável, mitigando as consequências das mudanças climáticas e ajudando a reduzir a vulnerabilidade do sistema de recursos hídricos (Gui, Chen e He, 2021).

A metodologia de análise de vulnerabilidade do sistema de recursos hídricos por meio de índices possui uma maior facilidade no que diz respeito à sua aplicação (Anandhi e Kannan, 2018; Nguyen *et al.*, 2020), isso quando comparada, por exemplo, ao método de funções. Entretanto, para a realização de uma análise da vulnerabilidade hídrica de forma holística, o estudo deve ser desenvolvido no nível de bacia hidrográfica (Sun *et al.*, 2016). Ainda, como forma de auxiliar no diagnóstico, a utilização de ferramentas como o Sistema de Informação Geográfica (GIS) desempenha um papel importante na visualização, interpretação e disseminação de informações (Haq *et al.*, 2012).

Dessa forma, buscando atender às necessidades do desenvolvimento econômico, social e ambientalmente sustentável, é imperativo identificar os principais fatores que contribuem ativamente com a vulnerabilidade hídrica, assim como as principais metodologias para a sua determinação. Assim, a presente revisão sistemática teve como objetivo principal a realização da seleção e da análise de estudos relacionados a sistemas de índices de vulnerabilidade hídrica georreferenciados a nível de bacia hidrográfica, identificando os principais fatores que contribuem ativamente com a vulnerabilidade hídrica.

Metodologia

A revisão sistemática foi conduzida conforme as diretrizes da metodologia Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020 (PRISMA 2020) (Liberati *et al.*, 2009). Desde modo, a metodologia é descrita segundo os itens: Elegibilidade, Identificação e Triagem e Inclusão e Análise quantitativa e qualitativa, conforme Figura 1.

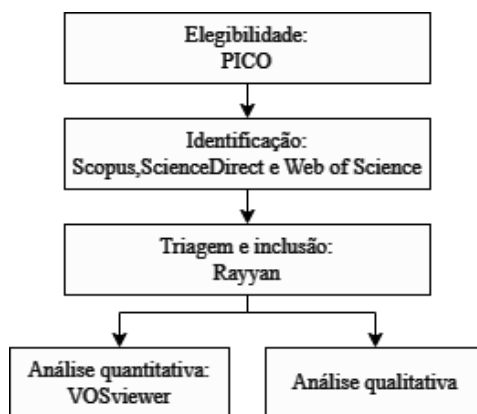


Figura 1. Fluxograma metodológico

Elegibilidad

A pergunta central da presente revisão sistemática foi estruturada a partir da metodologia PICO, acrônimo de Problem, Intervention, Comparison e Outcome. Profusamente utilizada em pesquisas clínicas, essa abordagem contribui para a delimitação da pesquisa de forma estruturada, conduzindo a resultados mais precisos e relevantes (Donato e Donato, 2019).

Dessa forma, a pergunta estabelecida foi : “Quais são as metodologias de construção de índices de vulnerabilidade hídrica, baseados em GIS e apoiados nos principais fatores de vulnerabilidade que interferem na disponibilidade hídrica (I), que servem de base para o desenvolvimento de estratégias de gestão de recursos hídricos mais eficazes, monitorando e promovendo intervenções de maneira a ampliar a segurança hídrica (O) na bacia hidrográfica (P), permitindo a comparação com a situação anterior a vulnerabilidade hídrica ou com outras bacias que não apresentam vulnerabilidade hídrica (C)”.

Diante do estabelecido para a pesquisa, os critérios de elegibilidade e de exclusão foram determinados. Para a inclusão foram considerados artigos que abordaram a construção de índices de vulnerabilidade hídrica georreferenciados para bacias hidrográficas, de maneira a servir como apoio para a gestão dos recursos hídricos, foram selecionados sem restrição de idioma ou data. Em contrapartida, o critério de exclusão fundamentou-se àqueles que não atenderam a pergunta central estabelecida, não estavam disponíveis eletronicamente, não revisados por pares, eram compostos por outras revisões e capítulos de livros.

Identificação

Através da definição da pergunta central da revisão sistemática, palavras chaves relacionadas foram discutidas, selecionadas e estruturadas, por meio de operadores booleanos, pelos autores. Dessa forma, a pesquisa nas diversas bases de dados se deu pela seguinte estrutura: ("vulnerability index" OR "multicriteria") AND ("scarcity" OR "vulnerability" OR "availability") AND ("water security" OR "hydrographic basin") AND ("GIS").

As bases de dados selecionadas para compor a pesquisa foram: Scopus, ScienceDirect e Web of Science, incluindo estudos datados até o dia 13 de abril de 2023, momento no qual foi realizada a consulta. A opção de escolha de mais de uma base de dados se deu como tentativa de tornar a análise mais abrangente.

Triagem e inclusão

A triagem dos artigos foi realizada previamente através da utilização do Rayyan (Ouzzani *et al.*, 2016) após a inserção dos artigos extraídos, em formato RIS, das referidas bases de dados. No software, a equipe de revisão foi composta por dois revisores, com o poder de selecionar ou excluir estudos inseridos, e um visualizador. As informações disponibilizadas para a equipe, para cada artigo inserido, foram o título, o resumo, os autores, o jornal de publicação, as palavras-

chave e o DOI. Após o consenso da equipe na seleção dos artigos pertinentes à pesquisa no Rayyan, a triagem seguiu para a sua leitura completa e posterior seleção final dos estudos.

Análise quantitativa e qualitativa

Através dos estudos selecionados, seguiu-se com as respectivas análises quantitativa e qualitativa. Para a análise quantitativa, foram elaborados mapas bibliométricos, que possuem o objetivo de visualizar e analisar a produção científica da área, diferindo da revisão sistemática que identifica, analisa e sintetiza estudos relevantes para uma pergunta de pesquisa específica. Dessa forma, foram elaborados os mapas de coautoria de autores e documentos, quando cocitados em um terceiro trabalho, coocorrência de palavras-chave e os países de coautoria através da utilização do software VOSviewer (Van Eck e Waltman, 2010).

Resultados e discussão

O fluxograma PRISMA 2020 com o mapeamento do número de registros identificados, incluídos e excluídos, assim como os motivos das exclusões, pode ser visualizada através da Figura 2.

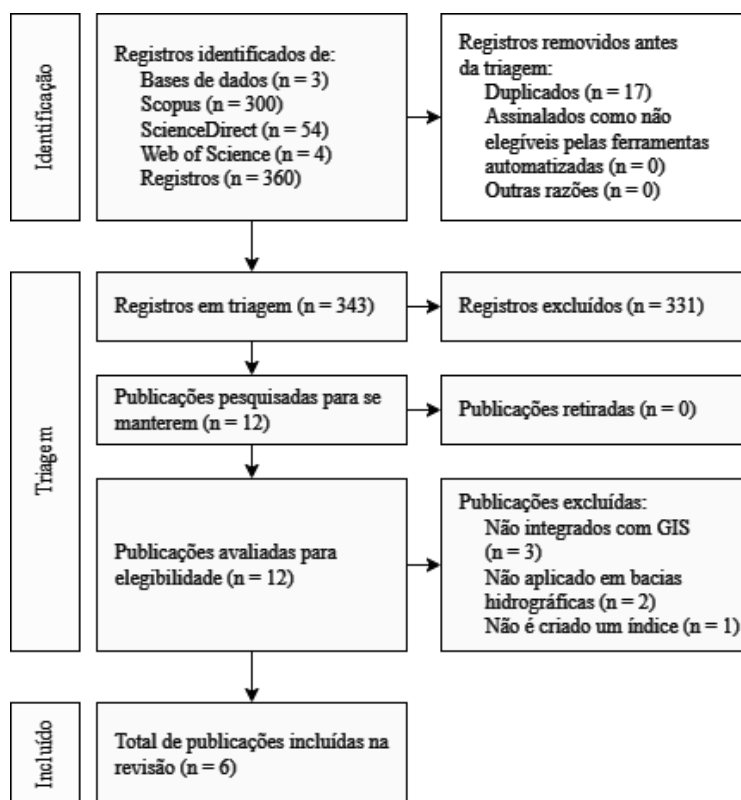


Figura 2. Fluxograma PRISMA 2020 para a identificação dos estudos através de bases de dados e registros

Análise quantitativa

No total, cerca de 360 artigos foram analisados, tendo a sua fonte do banco de dados distribuídas entre 300 publicações provenientes da Scopus, 56 publicações da ScienceDirect e 4 publicações da Web of Science. Através do software Rayyan foram pré-selecionados 12 artigos, representando cerca de 3.33% do total retornado. Assim, 6 dos 12 artigos foram selecionados por meio da leitura completa, representando 50% dos pré-selecionados e cerca de 1.67% do total retornado.

Os principais motivos de exclusão de registros no processo de pré-seleção no software Rayyan por parte da equipe de revisão foram aqueles que se dedicavam a análise da vulnerabilidade à contaminação, captação de água ou de desastres hídricos em geral e aqueles que enfatizavam as questões de infraestrutura, agricultura, aspectos sociais ou de ecologia de forma isolada. Já durante o processo de leitura completa, foram excluídos aqueles que não eram georreferenciados, aqueles que não aplicaram o modelo de índice e aqueles que não foram empregados em nível de bacia hidrográfica.

Dessa forma, foi realizada a análise dos seis artigos selecionados no software VOSviewer. Os mapas bibliométricos desenvolvidos evidenciaram uma forte conexão de coautoria entre os autores (Figura 3.a) e, também, entre os documentos (Figura 3.b). Como supracitado, essa conexão representa uma citação conjunta dos autores e documentos por um terceiro trabalho. Ainda, é observado uma grande relação de força e de frequência entre quatro palavras-chave, sendo elas China, vulnerability, drought e fuzzy mathematics.

Dentre as palavras chaves (Figura 3.c), pode-se destacar a presença da matemática difusa (tradução literal de fuzzy mathematics) e da China, além das palavras vulnerabilidade e seca. A matemática difusa vem da introdução da lógica Fuzzy por Zadeh (1965) através da teoria dos conjuntos Fuzzy. Ao contrário da lógica booleana que possui apenas os extremos falso e verdadeiro, a lógica Fuzzy varia em graus de associação de 0 a 1 podendo, desse modo, ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa. Dessa forma, é possível lidar com problemas onde a fonte de imprecisão é a ausência de critérios bem definidos (Zadeh, 1965), como os observados na temática de vulnerabilidade.

Por sua vez, de acordo com Zhang (2021), a China se desenvolveu aceleradamente entre 1978 e 2018 através de um grande consumo de recursos naturais. Dessa forma, a exploração não sustentável desses recursos teve como consequência uma deterioração dos recursos hídricos (Zhang, 2021). Ainda, devido a esse desenvolvimento, foi observado um aumento da sua população e uma mudança nos padrões de consumo de forma a elevar a demanda hídrica (Chen *et al.*, 2017). Ainda, no mapa de países em coautoria (Figura 4) também observar uma forte presença desse país.

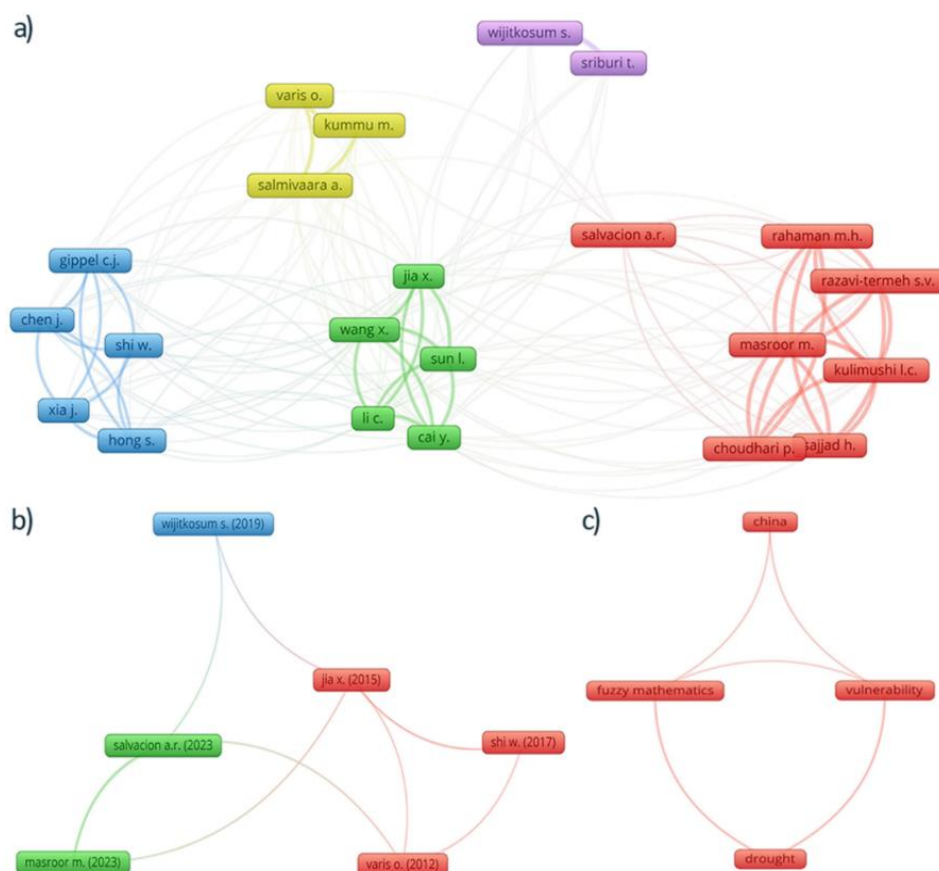


Figura 3. Mapas bibliométricos, desenvolvidos no VOSviewer, de a) coautoria de autores; b) coautoria de documentos; e c) coocorrência de palavras-chave.



Figura 4. Mapa bibliométrico de coautoria, desenvolvidos no VOSviewer, de países.

Análise qualitativa

Para a análise dos seis artigos selecionados, foram apuradas informações como o número total de citações na referida base de dados, o índice que foi desenvolvido e a sua metodologia de construção. Ainda, foram observados o local para qual o índice foi construído e os fatores utilizados. Essas duas últimas informações se tornam importantes uma vez que a influência de cada fator selecionado pode variar de acordo com as características específicas do local de estudo. A Tabela 1 apresenta um compilado dessas informações para cada artigo selecionado.

Os seis artigos apresentam uma diversidade de fatores físicos e socioeconômicos utilizados para a análise da vulnerabilidade hídrica, com variações tanto específicas quanto amplas. Entre os fatores físicos, fatores que medem a disponibilidade do recurso hídrico são predominantes, seguidos pelas características edafoclimáticas e do uso do solo. Já no campo dos fatores socioeconômicos, o acesso a recursos básicos e os fatores demográficos, como população e densidade populacional, surgem como os mais utilizados. A Tabela 2 apresenta uma síntese detalhada dos fatores utilizados nos artigos.

O primeiro e o mais recente estudo identificado na presente revisão sistemática foi desenvolvido por Salvacion (2023) como forma de avaliar o risco de seca ao nível das vilas na Ilha de Marinduque, Filipinas. Por possuir um status insular, a ilha de Marinduque é mais propensa a desastres ecológicos e hidrológicos e, provavelmente, mais vulnerável às mudanças climáticas. Dessa maneira, a identificação e quantificação do risco de seca prosseguiu considerando fatores naturais e socioeconômicos.

Dentre os fatores naturais, os dados climáticos para a região foram obtidos através do banco de dados TerraClimate, servindo como base para identificação de eventos de seca por meio do Índice Padrão de Precipitação (SPI). Assim, a análise do risco de seca foi construída pela análise de três componentes principais: o perigo de seca, a vulnerabilidade física e a vulnerabilidade socioeconômica. Enquanto o perigo de seca foi avaliado por meio de Análise de Componentes Principais (PCA), a vulnerabilidade física foi avaliada através da Lógica Fuzzy. Por fim, a vulnerabilidade socioeconômica foi analisada através de uma combinação de dados, resultando em um índice específico.

Como resultado, foi identificado que as áreas de maior vulnerabilidade estão localizadas no noroeste e partes orientais da província, influenciadas pela topografia e pelo seu clima. Vilas situadas em áreas montanhosas com baixos níveis de precipitação, bem como aquelas com alta vulnerabilidade socioeconômica, caracterizada por uma significativa população de mulheres, idosos e famílias agrícolas, são as mais suscetíveis aos impactos da seca.

Tabela 1. Compilado dos artigos selecionados

Autores	Citações	Local	Índice	Metodologia	Aplicação	Fatores
Salvacion (2023)	0	Ilha de Marinduque, Filipinas	Risco de Seca	SPI, PCA, Lógica Fuzzy e índice específico	Analizou eventos de seca com o SPI. Avaliou o risco de seca por meio de três componentes: perigo (PCA), vulnerabilidade física (Lógica Fuzzy) e vulnerabilidade socioeconômica (índice específico)	5 naturais e 9 socioeconômicos
Masroor <i>et al.</i> (2023)	2	Sub-bacia central de Godavari, Índia	Vulnerabilidade à Seca	SPI, FR, ANFIS e ROC	Analizou eventos de seca com o SPI. Aplicou o FR para determinar a relação entre os fatores selecionados e os eventos de seca. Utilizou o ANFIS para mapear a vulnerabilidade à seca. Utilizou o ROC para a validação do modelo	19 naturais e 5 socioeconômicos
Wijitkosum e Sriburi (2019)	37	Alto da Bacia do Rio Phetchaburi, Tailândia	Risco de Seca	Fuzzy AHP	Utilizou o Fuzzy AHP atribuir pesos aos fatores selecionados. Realizou-se a soma ponderada para o cálculo do risco de seca	10 naturais
Shi <i>et al.</i> (2017)	7	Bacia do rio Haihe, China	Vulnerabilidade Hídrica	Funções e Entropia	Utilizou duas metodologias de maneira a compará-las: abordagem de funções (baseada no conceito de vulnerabilidade pelo IPCC) e a atribuição de pesos para os fatores selecionados pelo método da Entropia	3 naturais e 5 socioeconômicos
Jia <i>et al.</i> (2015)	41	Bacia do rio Amarelo, China	Segurança Hídrica	TOPSIS, GRA, VS, ME, SPA e Fuzzy AHP	Inicialmente aplicou o TOPSIS, GRA, VS e ME de forma individual, tendo a consistência e conexão dos seus resultados analisados pelo SPA. Aplicou o Fuzzy AHP para a atribuição de pesos aos resultados do SPA	9 naturais e 6 socioeconômicos
Varis, Kummu e Salmivaara (2012)	99	10 bacias da região Ásia-Pacífico	Vulnerabilidade de Bacia	DPSIR e indicadores específicos	Utilizou duas metodologias de maneira a compará-las: aplicação do DIPSIR considerando seis categorias indicadoras (governança, economia, questões sociais, meio ambiente, riscos hídricos e escassez hídrica) e a indexação integrada através do emprego de indicadores representativos para as mesmas seis categorias indicadoras	7 naturais e 13 socioeconômicos

SPI = Standardised Precipitation Evapotranspiration; PCA = Principal Component Analysis; FR = Frequency Ratio; ANFIS = Adaptive Neuro Fuzzy Inference System; ROC = Receiver Operating Characteristic; AHP = Analytic Hierarchy Process; TOPSIS = Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution; GRA = Gray Relational Analysis; VS = Vague Sets; ME = Matter Element; SPA = Set Pair Analysis; DPSIR = Driving forces e Pressures e States e Impacts e Responses Model.

Tabela 2. Detalhamento dos fatores físicos e socioeconômicos utilizados nos artigos selecionados

Autores	Fatores	
	Naturais	Socioeconômicos
Salvacion (2023)	Elevação; Inclinação; SPI; Textura do solo; Uso do solo	Acesso à água potável; Assentamentos informais; Engajamento agrícola; Idosos; População; População feminina; População infantil; Renda per capita; Taxa de desemprego
Masroor <i>et al.</i> (2023)	Água Subterrânea Pós-Monsoon; Água Subterrânea Pré-Monsoon; Água Superficial; Área Líquida Semeada; Cultura Kharif; Cultura Rabi; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; Índice de Água por Diferença Normalizada - Água; Índice de Água por Diferença Normalizada - Folha; Precipitação; Precipitação Mensal Total; Temperatura Máxima Mais Baixa; Temperatura Mínima do Solo; Temperatura Mínima Média; Tendência da Temperatura Máxima Mais Alta; Tendência de Dias Chuvosos; Terras em Pousio; Tipo de Solo; Umidade Relativa	Densidade Populacional; Densidade de Renda; Índice de Desenvolvimento Humano; Taxa de Alfabetização; Taxa de Mortalidade Infantil
Wijitkosum e Sriburi (2019)	Cobertura da Terra; Drenagem do Solo; Elevação; Erosão do Solo; Fertilidade do Solo; Inclinação; Índice de Aridez; Precipitação; Textura do Solo; Uso da Terra	-
Shi <i>et al.</i> (2017)	Fator de produção de água; Percentual de anomalia da precipitação anual; Produção de água da área de estudo	Consumo de água por Produto Interno Bruto; Densidade populacional; Emissão per capita de águas residuais; Produto Interno Bruto per capita; Razão entre oferta e demanda de água
Jia <i>et al.</i> (2015)	Coeficiente de produção de água; Escoamento anual; Índice de Recursos Hídricos Subterrâneos; Índice de balanço hídrico; Índice de produção de água; Índice de utilização da bacia hidrográfica; Poluição fluvial; Recursos Hídricos per Capta; Superextração de água subterrânea	Acesso a água potável em áreas rurais; Acesso a água potável em áreas urbanas; Consumo de água per capita; Consumo de água por Produto Interno Bruto; Retirada da água superficial; Retirada da água subterrânea
Varis, Kummu e Salmivaara (2012)	Área da bacia; Área de superfície (cidade); Escoamento superficial; Estresse hídrico; Multirriscos; Precipitação; Sistemas ambientais	Corrupção; Densidade populacional; Desnutrição; Fragilidade do estado; Índice de Pobreza Multidimensional; Instabilidade política; Mortalidade infantil; Pegada humana; População; População em favelas; Pobreza; Renda Nacional Bruta per capita; Taxa de alfabetização

Já o estudo de Masroor (2023), publicado no mesmo ano, teve como região de estudo a sub-bacia central do Godavari, Índia. Essa região, segundo o autor, é uma região suscetível a eventos de seca recorrentes. Dessa forma, foi objetivada a avaliação de sua vulnerabilidade à seca através da análise de uma ampla gama de fatores socioeconômicos e naturais, de modo a identificar a sua influência na frequência e na gravidade das secas na região.

Entre os fatores coletados para a análise estão informações sobre o solo, sobre os recursos hídricos, dados climáticos, taxas de alfabetização, níveis de renda, densidade populacional, mortalidade infantil, entre outros. Esses dados foram processados através do método de interpolação Peso da Distância Inversa (IDW). Ainda, assim como Salvacion (2023), foi utilizado o SPI em um grande intervalo temporal. O modelo de Razão de Frequência (FR) aplicado como forma de determinar a relação entre os fatores condicionantes e a ocorrência real da seca na região. Ainda, o estudo adotou o Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo (ANFIS), uma combinação entre redes neurais artificiais (ANN) e a lógica Fuzzy, como forma de mapear a vulnerabilidade à seca através dos dados obtidos com a FR. O modelo foi validado através de métricas como a curva de Característica Operacional do Receptor (ROC), erro quadrático médio, erro absoluto médio e erro quadrado médio.

Os resultados encontrados evidenciam uma grande relação de determinados parâmetros, como o baixo Índice de Vegetação Normalizada (NDVI) e o aumento das temperaturas, com a vulnerabilidade à seca na região da sub-bacia. Ainda, foi enfatizado que os fatores socioeconômicos também desempenharam um importante papel na determinação dessa vulnerabilidade. A utilização do modelo ANFIS demonstrou uma alta precisão na vulnerabilidade em diferentes escalas temporais, possuindo um grande potencial para o auxílio da gestão dos recursos hídricos da região.

Outra abordagem utilizada para a análise do risco à seca, desta vez na região do alto da Bacia do Rio Phetchaburi, Tailândia, foi realizada por Wijitkosum e Sriburi (2019). A bacia hidrográfica em questão possui uma crescente preocupação devido aos recorrentes eventos de seca. Assim, o artigo objetivou aprofundar a compreensão do risco de seca na região, fornecendo uma visão dos fatores que contribuem para essa problemática de maneira a subsidiar possíveis medidas de mitigação.

Para essa análise, foram utilizados os fatores naturais relacionados a dados meteorológicos, características físicas da região, propriedades do solo e informações sobre o uso e a cobertura do solo. Dessa forma, o diagnóstico da região seguiu baseando-se no uso da Análise Hierárquica de Processos Fuzzy (FAHP). Essa metodologia se mostrou essencial para analisar os múltiplos critérios estabelecidos em um ambiente de incerteza.

As descobertas enfatizam que fatores climáticos, como a precipitação, e fatores físicos, como a topografia e gradientes de inclinação, desempenham papéis cruciais no risco de seca. Além disso, as atividades humanas, como o desmatamento e as mudanças no uso do solo, contribuem significativamente para o aumento deste risco. Dessa forma, são necessárias medidas como a preservação de florestas em áreas de topo para o seu enfrentamento.

Outra abordagem sobre o tema é levantada por Shi *et al.* (2017), objetivando investigar a vulnerabilidade hídrica na Bacia do Rio Haihe, China. Essa localidade enfrenta desafios significativos devido à alta densidade populacional e ao alto desenvolvimento econômico, acompanhadas do aumento da ocorrência de secas e inundações.

Baseado no conceito de vulnerabilidade proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o artigo aplica uma abordagem de função através da consideração de fatores como a exposição, risco de desastres, sensibilidade às mudanças climáticas e a qualidade da água. Ainda, o artigo realiza a comparação dessa abordagem com o método de índices, objeto de estudo da presente revisão sistemática, selecionando indicadores naturais e socioambientais. Esses indicadores foram padronizados através da metodologia de Padronização Alvo, sendo atribuídos pesos através do método de Entropia.

Embora a abordagem baseada em funções tenha apresentado uma maior sensibilidade, se apresentando como um método de maior complexidade, tanto ela quanto o método de indicadores apontaram níveis elevados de vulnerabilidade para a região de estudo. Ainda, foram apontadas estratégias adaptativas para a região, enfatizando a gestão eficiente dos recursos hídricos, a proteção da qualidade da água e práticas sustentáveis.

O artigo de Jia *et al.* (2015), por sua vez, concentrou-se na avaliação da segurança hídrica na estratégica Bacia do Rio Amarelo, China. Compreendendo uma área de extrema importância para o fornecimento de água a mais de 107 milhões de habitantes, essa região enfrenta significativos desafios relacionados à gestão dos seus recursos hídricos. Dessa maneira, o estudo oferece uma análise da segurança hídrica da bacia de maneira a apoiar o desenvolvimento socioeconômico e a preservação dos ecossistemas locais.

Para isso, o estudo apresentou uma metodologia integrada e inovadora, resultado de uma combinação entre a Análise de Conjuntos de Pares (SPA), Análise Hierárquica de Processo Fuzzy (FAHP), Técnica de Ordem por Similaridade com Solução Ideal (TOPSIS), Análise Relacional Cinza (GRA), Conjuntos Vagos (VS) e modelos de Elementos de Matéria (ME). Inicialmente, os métodos TOPSIS, GRA, VS e ME foram aplicados de maneira individualizada, sendo os seus resultados submetidos ao emprego do SPA para a análise de consistência e de conexão. Em seguida, o FAHP foi utilizado como forma de atribuir pesos para os resultados obtidos pelo SPA, gerando uma classificação abrangente e integrada.

Os resultados obtidos por meio dessa abordagem multifacetada revelaram que diferentes regiões da bacia mostraram níveis variados de segurança hídrica. Além disso, foi destacado a importância da integração de múltiplas metodologias em contraposição à aplicação isolada de modelos. A

utilização desse tipo de abordagem, apoiadas principalmente no SPA e FAHP, demonstrou sua eficácia ao proporcionar resultados robustos e confiáveis para a região de estudo.

Por fim, o estudo desenvolvido por Varis, Kummu e Salmivaara (2012) se concentra na avaliação da vulnerabilidade, de forma ampla, de dez grandes bacias localizadas na região da Ásia-Pacífico. Essa área abrange uma parte significativa do continente asiático, abrigando uma parcela considerável da população mundial. Assim, a compreensão e análise da vulnerabilidade dessas bacias são essenciais para o sustento e a qualidade de vida das populações nelas residentes.

Dessa maneira, foram propostas duas abordagens distintas. A primeira segue a metodologia de forças motrizes (DPSIR), que envolve a consideração de seis categorias de indicadores que foram avaliadas de forma individual, sendo elas: governança, economia, questões sociais, meio ambiente, riscos hídricos e escassez hídrica. A segunda abordagem adota a indexação integrada através da utilização de um indicador representativo para cada categoria mencionada, permitindo, assim, uma avaliação comparativa global.

Através dessa abordagem, os resultados indicaram que, dentre as dez bacias hidrográficas analisadas, as sul-asiáticas foram as mais vulneráveis. Ainda, foi evidenciada a grande influência de diversos fatores, que vão da governança até as questões sociais, na vulnerabilidade de bacias, destacando a complexidade de suas interações. Dessa forma, é ressaltada a importância da consideração de uma ampla gama de dimensões para a realização de uma análise mais representativa do local.

Diante disso, é notória a diversidade metodológica aplicada à análise da vulnerabilidade hídrica, o que reflete uma busca constante por abordagens que integrem múltiplos fatores e ofereçam maior precisão na caracterização dos riscos associados à escassez de recursos hídricos. Dentre as metodologias identificadas, destaca-se o uso recorrente da lógica Fuzzy, presente em quatro dos seis artigos analisados, consolidando-se como uma ferramenta robusta para tratar a incerteza inerente às variáveis ambientais e socioeconômicas. A lógica Fuzzy, por permitir a incorporação de diferentes graus de pertencimento das variáveis, se apresenta como uma abordagem eficaz em cenários onde os dados são imprecisos ou incompletos, fator comum nas análises ambientais. Ainda, essa metodologia se mostrou útil para a padronização das diferentes unidades de medidas, possibilitando a agregação e, consequentemente, a consideração de fatores distintos em uma análise no SIG.

A Análise Hierárquica de Processos (AHP), amplamente utilizada em combinação com a lógica Fuzzy (FAHP), surge como a segunda metodologia mais empregada, sendo sua integração justificada pela necessidade de aprimorar o processo convencional de atribuição de pesos aos fatores analisados. Essa combinação se revelou eficiente para fornecer resultados mais detalhados e precisos, lidando com julgamentos vagos inerentes do processo em contextos em

que múltiplos critérios são considerados. Além disso, seu emprego se mostrou o mais flexível dentre os artigos selecionados, conseguindo lidar com diferentes tipos de dados e integrando percepções variadas de julgamento, o que é dificilmente encontrada em outros métodos de análise. Ainda, metodologias de modelagem como o ANFIS, utilizado por Masroor (2023), expandem as possibilidades de modelagem da vulnerabilidade ao integrar inteligência artificial e técnicas estatísticas de alta complexidade.

Contudo, as diferentes abordagens dos índices apresentam limitações e complementaridades. Os índices que se concentram no risco de seca, como o SPI, são extremamente úteis para mapear a suscetibilidade das áreas à escassez hídrica, especialmente em regiões sujeitas a variabilidade climática extrema. No entanto, ao limitar a análise à disponibilidade quantitativa da água, tais índices podem não capturar a dimensão qualitativa da segurança hídrica, essencial para regiões onde a qualidade da água é igualmente ou mais importante que a sua quantidade. Dessa forma, as análises multidimensionais, que consideram a vulnerabilidade ou a segurança hídrica como um todo, são mais precisas uma vez que a temática não pode ser compreendida de maneira unidimensional.

Entretanto, embora os artigos apresentem abordagens distintas sobre o tema, um ponto em comum observado em todos os estudos é a utilização da distribuição da precipitação como ponto chave da análise da vulnerabilidade hídrica. Sua utilização é reflexo do seu efeito na alimentação do escoamento superficial, da umidade do solo e da recarga das águas subterrâneas, sendo o fator mais representativo da disponibilidade hídrica de uma área (Chhetri *et al.*, 2020).

Outros fatores naturais amplamente utilizados foram os das características do solo, que incluem textura, drenagem, fertilidade e erosão (Salvacion, 2023; Masroor *et al.*, 2023; Wijitkosum e Sriburi, 2019). Esses elementos, combinados com o uso do solo, declividade e elevação, influenciam processos de erosão e retenção de água, refletindo sua importância na modelagem do ambiente físico (Salvacion, 2023; Masroor *et al.*, 2023; Wijitkosum e Sriburi, 2019).

Além dos fatores naturais, os fatores socioeconômicos desempenharam um papel crucial. Fatores demográficos, como a densidade populacional, foram os mais recorrentes dentro do grupo temático sendo utilizados em todos os artigos que consideraram fatores socioeconômicos. Esses fatores se fazem fundamentais para a avaliação dos impactos da distribuição populacional na disponibilidade de recursos hídricos e vulnerabilidade socioambiental. Da mesma forma, a economia, com fatores como renda per capita e PIB per capita, foi destacada em quatro artigos, ressaltando a influência das condições econômicas nas populações vulneráveis.

Fatores educacionais, como a taxa de alfabetização, apareceram em dois estudos, apontando a importância da educação no desenvolvimento socioeconômico e sua influência na vulnerabilidade hídrica. Essa intersecção entre fatores físicos e socioeconômicos evidencia que a

análise da vulnerabilidade hídrica exige uma compreensão multidimensional, onde elementos ambientais, demográficos e econômicos se sobrepõem para determinar o grau de exposição e resiliência de uma população.

É importante destacar que, ao identificar áreas vulneráveis, a implementação de soluções práticas e inovadoras se torna essencial. A integração de tecnologias emergentes e a adoção de sistemas de governança adaptativos oferecem caminhos promissores para lidar com esses desafios. Abordagens de modelagem híbrida, que combinam diversas técnicas analíticas e computacionais, podem criar oportunidades para prever cenários futuros e mitigar vulnerabilidades de forma mais eficaz. Além disso, a colaboração interdisciplinar é fundamental, englobando não apenas pesquisadores e formuladores de políticas públicas, mas também as comunidades locais, assegurando que as soluções propostas sejam sustentáveis, inclusivas e equitativas.

Conclusão

A presente revisão sistemática teve seu enfoque na seleção e na análise de estudos relacionados a sistemas de índices georreferenciados para o cálculo da vulnerabilidade hídrica em bacias hidrográficas, realizando mapas bibliométricos de forma a traçar as conexões intelectuais entre as pesquisas. Dos 360 artigos retornados pelas bases de dados utilizadas, apenas 6 foram selecionados. Os mapas bibliométricos evidenciaram uma forte correlação de coautoria entre esses documentos e de seus autores, além de destacar uma grande relação de força e de frequência entre as palavras-chave China, vulnerability, drought e fuzzy mathematics.

A predominância da lógica Fuzzy e da Análise Hierárquica de Processos Fuzzy (FAHP) aponta para a necessidade crescente de metodologias capazes de lidar com a incerteza na tomada de decisão, especialmente em contextos em que há uma sobreposição de fatores naturais e antrópicos. A aplicabilidade de metodologias mais avançadas, como a Inteligência Artificial e os modelos híbridos, podem agregar ainda mais valor ao processo de análise em contextos de vulnerabilidade hídrica complexa.

Além disso, a ênfase recorrente nos aspectos quantitativos como elementos centrais para a aferição da vulnerabilidade hídrica, reflete uma visão consolidada, mas ao mesmo tempo limitada, da vulnerabilidade. Embora esses fatores sejam cruciais, a complexidade das bacias hidrográficas e das suas populações exige que as análises sejam multidimensionais, considerando fatores qualitativos, como a qualidade da água, as práticas de governança e resiliência comunitária. A integração dessas dimensões pode revelar vulnerabilidades ainda não mapeadas, permitindo uma visão mais abrangente e inclusiva das ameaças ao sistema hídrico.

Por fim, a implementação de soluções inovadoras, baseadas em tecnologias emergentes e em modelos híbridos de governança, é crucial para mitigar os impactos da vulnerabilidade hídrica

de forma eficaz. A colaboração interdisciplinar e a inclusão das comunidades locais no processo de tomada de decisões são essenciais para garantir que as medidas adotadas sejam sustentáveis, inclusivas e adaptadas às realidades socioeconômicas e ambientais das regiões mais afetadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora e a ArcelorMittal pelo apoio a pesquisa via projeto P&D – Previsibilidade de Bacias.

Referências bibliográficas

- Alcamo, J., Dronin, N., Endejan, M., Golubev, G., Kirilenko, A. (2007) A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Global Environmental Change*, **17**(3-4), 429-444. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006>
- Alonso, C., Gouveia, C. M., Russo, A., Páscoa, P. (2019) Crops' exposure, sensitivity and adaptive capacity to drought occurrence. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **19**(12), 2727-2743. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2727-2019>
- Anandhi, A., Kannan, N. (2018) 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*, **557**, 460-474. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.032>
- Bullock, J. A., Haddow, G. D., Coppola, D. P. (2018) *Homeland Security: The Essentials*, 2a ed., Elsevier, Amsterdam, 438 pp.
- Chen, W., Wu, S., Lei, Y., Li, S. (2017) China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. *Ecological indicators*, **74**, 321-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.037>
- Chhetri, R., Kumar, P., Pandey, Vishnu, P., Singh, R., Pandey, S. (2020) Vulnerability assessment of water resources in hilly region of Nepal. *Sustainable Water Resources Management*, **6**(3), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00391-x>
- Donato, H., Donato, M. (2019) Stages for Undertaking a Systematic Review. *Acta Médica Portuguesa*, **32** (3), 227–235. <https://doi.org/10.20344/amp.11923>
- Gui, Z., Chen, X., He, Y. (2021) Spatiotemporal analysis of water resources system vulnerability in the Lancang River Basin, China. *Journal of Hydrology*, **601**, 126614. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126614>
- Haq, M., Akhtar, M., Muhammad, S., Paras, S., Rahmatullah, J. (2012) Techniques of remote sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: a case study of Sindh province, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **15**(2), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.07.002>
- Hoekstra, A. Y., Buurman, J., Van Ginkel, K. C. (2018) Urban water security: A review. *Environmental research letters*, **13**(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52>
- Huang, Y., Xu, L., Yin, H., Cai, Y., Yang, Z. (2015) Dual-level material and psychological assessment of urban water security in a water-stressed coastal city. *Sustainability*, **7**(4), 3900-3918. <https://doi.org/10.3390/su7043900>
- Jéquier, E., Constant, F. (2010) Water as an essential nutrient: the physiological basis of hydration. *European Journal of Clinical Nutrition*, **64**, 115-123. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2009.111>
- Jia, X., Li, C., Cai, Y., Wang, X., Sun, L. (2015) An improved method for integrated water security assessment in the Yellow River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **29**, 2213-2227. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-1012-2>

- Li, Y., Lin, C., Wang, Y., Gao, X., Xie, T., Hai, R., Zhang, X. (2017) Multi-criteria evaluation method for site selection of industrial wastewater discharge in coastal regions. *Journal of Cleaner Production*, **161**, 1143-1152. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.030>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., Moher, D. (2009) The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *PLoS medicine*, **6**(7) <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Masroor, M., Razavi-Termeh, S. V., Rahaman, M. H., Choudhari, P., Kulimushi, L. C., Sajjad, H. (2023) Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) machine learning algorithm for assessing environmental and socio-economic vulnerability to drought: A study in Godavari middle sub-basin, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **37**(1), 233-259. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02292-1>
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, H. Q., Luu, C., Dang, K. B., Liu, Y., Zhang, X. (2020) New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam. *Science of the Total Environment*, **737**, 139784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139784>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., Ahmed, E. (2016) Rayyan - a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, **210**(5) <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Sadeghravesh, M. H., Khosravi, H., Ghasemian, S. (2015) Application of fuzzy analytical hierarchy process for assessment of combating-desertification alternatives in central Iran. *Natural hazards*, **75**, 653-667. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1345-7>
- Salvacion, A. R. (2023) Delineating village-level drought risk in Marinduque Island, Philippines. *Natural Hazards*, **116**(3), 2993-3014. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05795-w>
- Satish Kumar, K., AnandRaj, P., Sreelatha, K., Sridhar, V. (2021) Regional analysis of drought severity-duration-frequency and severity-area-frequency curves in the Godavari River Basin, India. *International Journal of Climatology*, **41**(12), 5481-5501. <https://doi.org/10.1002/joc.7137>
- Shi, W., Xia, J., Gippel, C. J., Chen, J., Hong, S. (2017) Influence of disaster risk, exposure and water quality on vulnerability of surface water resources under a changing climate in the Haihe River basin. *Water International*, **42**(4), 462-485. <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1301143>
- Sun, F., Kuang, W., Xiang, W., Che, Y. (2016) Mapping water vulnerability of the Yangtze River Basin: 1994–2013. *Environmental management*, **58**, 857-872. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0756-5>
- Van Eck, N. J., Waltman, L. (2010) Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, **84**(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Varis, O., Kummu, M., Salmivaara, A. (2012) Ten major rivers in monsoon Asia-Pacific: An assessment of vulnerability. *Applied Geography*, **32**(2), 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.003>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Bunn, S. E. G., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., Davies, P. M. (2010) Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, **467**(7315), 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Wijitkosum, S., Sriburi, T. (2019) Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from upper Phetchaburi River basin, Thailand. *Water*, **11**(5), 939. <https://doi.org/10.3390/w11050939>
- Wu, B., Ma, Z., Yan, N. (2020) Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics. *Remote sensing of environment*, **244**, 111813. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111813>
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy sets. *Information and control*, **8**(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, C., Li, J., Zhou, Z., Sun, Y. (2021) Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, **120**, 106974. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110687>